

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Combinaison cohérente de faisceaux laser pour les télécommunications optiques en espace libre à haut débit

Référence : **PHY-DOTA-2026-09**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre 2026 à Janvier 2027
selon le type de financement

Date limite de candidature : 01/06/2026

Mots clés :

Combinaison cohérente, Télécommunications optiques, Laser, Polarisation

Profil et compétences recherchées :

Ecole d'ingénieur, Normale, Master 2 spécialisé en optique ou traitement du signal pour les télécoms. Goût marqué pour l'expérimentation en optique, ainsi que le traitement du signal et la programmation.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Au fil des années, la quantité de données transmises à l'échelle mondiale ne cesse d'augmenter. Pour répondre à cette demande croissante, de nouveaux réseaux de télécommunications sol-sol ou sol-satellites de très haut débit sont en cours de développement [1]. Pour exemple, l'agence spatiale européenne donne une première estimation du débit pour des liaisons optiques bidirectionnelles inter-satellites et sol-satellite à 1 Tbit/s [2]. L'ONERA travaille depuis plusieurs années sur le développement de la station sol FEELINGS pouvant réaliser un lien vers un satellite géostationnaire à une distance de plus de 30 000 km. Pour augmenter le débit télécom, nous devons mettre en place de nouvelles techniques telles que les multiplexages en longueur d'onde (WDM), en polarisation (PDM), ou éventuellement en modes (MDM) mais également utiliser des formats de modulation plus complexes présentant plusieurs états de modulation. Cependant, pour pouvoir réaliser de tels liens, il faut composer avec la turbulence atmosphérique ainsi que la divergence du faisceau, qui contraignent le bilan de liaison. Ces contraintes demandent de réaliser des sources suffisamment puissantes, de l'ordre de quelques dizaines de Watts par canal. Une source grandement multiplexée constituée d'un grand nombre de canaux doit alors dépasser la centaine de Watt tout en étant robuste à la déformation de l'information télécom et à la panne fonctionnelle. La réalisation d'amplificateurs au-delà de quelques dizaines de Watts demeure aujourd'hui un enjeu technologique majeur, notamment à cause des effets non linéaire et thermiques.

La combinaison cohérente (*coherent beam combining, CBC*) est une approche pour pallier cette limitation. Cette technique repose sur la réalisation d'interférences constructives de plusieurs amplificateurs fonctionnant en régime de confort pour dépasser la puissance d'un amplificateur unique. Pour maintenir ces interférences constructives, il faut asservir la phase de chaque voie. Cependant, pour maximiser les interférences de faisceaux WDM-télécom qui disposent d'une très grande largeur spectrale, la mise en phase seule ne suffit pas. En effet, il faut aussi s'assurer que les longueurs physiques des voies soient égalisées à moins de la dizaine de microns près. Cela permet d'optimiser le contraste des interférences. Les études récentes dont une thèse issue de notre collaboration entre l'ONERA et l'institut FOTON [3,4] ont montré que les propriétés télécoms (taux d'erreurs binaires, ouverture du diagramme de l'œil), sont conservées lorsque la combinaison est réalisée sur des formats télécoms élémentaires de type On-Off Keying (OOK).

Dans ce contexte, nous proposons d'améliorer le démonstrateur de CBC WDM-télécom de l'ONERA réalisé lors du projet de thèse sortant [4] afin d'explorer l'applicabilité de ce système laser à des formats télécom plus complexes.

Le projet de thèse sera divisé en trois volets complémentaires. Le/la doctorant(e) commencera par s'approprier les principes de base de la CBC WDM-télécom et des communications optiques (bibliographie et expérimentation sur le banc laser). Il s'en suivra notamment un travail de compréhension des effets non-linéaires qui sont générés par l'amplification d'un signal WDM. Une exploration de l'impact de ces effets non linéaire sur la performance de la combinaison cohérente sera ensuite menée. Enfin, pour explorer de nouveaux formats de modulation au-delà du OOK et DPSK, un multiplexage en polarisation (PDM) deviendra nécessaire. Le/la doctorant(e) sera amené à élaborer une expérience démonstrative de la bonne adéquation d'un multiplexage en polarisation de faisceaux combinés et de son impact sur les performances télécoms. Pour conclure cet ultime volet, le/la jeune chercheur(se) travaillera sur l'éventualité de combiner des faisceaux WDM-télécoms multiplexés en polarisation.

Le/la doctorant(e) sera intégré(e) et encadré(e) dans une équipe ONERA-FOTON, spécialiste de la combinaison cohérente de sources laser à modulation télécom. L'institut FOTON apporte notamment l'expertise matérielle pour l'analyse des performances télécom. Le/la doctorant(e) disposera d'un banc d'étude

CBC avancé, dédié aux travaux de la thèse. Son travail sera jalonné par des publications marquantes au croisement entre la CBC et les télécoms optiques en espace libre.

- [1] Alimi IA, Monteiro PP. Revolutionizing Free-Space Optics: A Survey of Enabling Technologies, Challenges, Trends, and Prospects of Beyond 5G Free-Space Optical (FSO) Communication Systems. *Sensors*. 2024; 24(24):8036. <https://doi.org/10.3390/s24248036>.
- [2] <https://connectivity.esa.int/esa-specification-terabitsec-optical-links-estol>.
- [3] Bastien Rouzé, Pierre Pichon, Mathilde Gay, Laurent Bramerie, Laurent Lombard, and Anne Durécu, "Experimental study of the impact of carrying a telecom signal on LOCSET-based coherent beam combining," *Opt. Express* **31**, 26552-26564 (2023).
- [4] Thomas Le Beux, Laurent Bramerie, Thierry Chartier, Mathilde Gay, Laurent Lombard, Pierre Pichon, and Bastien Rouzé, "Coherent beam combining of wavelength-division multiplexed telecom signals: toward high-power and high-bit-rate free-space optical telecommunications," *Opt. Express* **33**, 5600-5614 (2025).

Collaborations envisagées :

Institut FOTON (Lannion, Bretagne)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Pierre Pichon, Bastien Rouzé

Tél. : 01 80 38 63 24

Email : pierre.pichon@onera.fr ; bastien.rouze@onera.fr

Directeur de thèse :

Nom : Chartier, Thierry

Laboratoire : Institut FOTON

Tél. : 02 96 46 91 44

Email : thierry.chartier@enssat.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>