

## Invitation à la soutenance de thèse

OPTIQUE ADAPTATIVE INTÉGRÉE POUR L'ATTÉNUATION DES EFFETS  
DE LA TURBULENCE ATMOSPHÉRIQUE SUR LES LIAISONS OPTIQUES

INTEGRATED ADAPTIVE OPTICS FOR ATMOSPHERIC TURBULENCE  
EFFECTS MITIGATION ON OPTICAL LINKS

Yann Lucas

**Mardi 10 décembre 2024 à 15h00**

Observatoire de Paris  
77 Avenue Denfert Rochereau, 75014 Paris  
Bâtiment Perrault, salle du Conseil

### Devant le jury composé de :

Sylvestre LACOUR	Chargé de recherche, Observatoire de Paris	Rapporteur & Examineur
Mikhail VORONTSOV	Professeur, Université de Dayton	Rapporteur & Examineur
Antonella BOGONI	Professeure, Ecole Supérieur Sant'Anna	Examinatrice
Julien FADE	Professeur, Institut Fresnel	Examineur
Vincent MICHAU	Directeur de recherche, ONERA	Directeur de thèse
Guillermo MARTIN	Maître de conférences, IPAG	Co-directeur de thèse
Serge MEIMON	Directeur de recherche, ONERA	Co-encadrant de thèse

### Résumé :

Les liaisons optiques représentent une solution prometteuse au besoin croissant en communication en espace libre. A la réception, l'injection du signal optique dans une fibre optique monomode permet un débit élevé en utilisant les composants déjà développés pour les communications fibrées. Néanmoins, cette injection peut être fortement perturbée par les effets de la turbulence atmosphérique. Pour s'affranchir de ces effets, l'optique adaptative (OA) est couramment utilisée. Une approche alternative, appelée ici OA-intégrée, a été récemment proposée. Elle est basée sur un démultiplexeur spatial suivi d'un circuit photonique intégré (PIC) assurant l'injection dans la fibre après combinaison cohérente. L'OA-intégrée pourrait représenter une solution compacte et robuste s'appliquant aussi aux fortes perturbations. Sa mise en œuvre nécessite toutefois la réalisation d'un PIC complexe, avec des pertes minimales et des déphaseurs rapides pour un contrôle en temps réel. Or les PIC actuels ne répondent pas à ces besoins. Les PIC en Niobate de Lithium autorisent des déphasages très rapides mais pas une architecture complexe, alors que la technologie Silicium (Si) permet des architectures complexes, mais des déphaseurs relativement lents. Par ailleurs, les pertes sont encore élevées avec les deux technologies. Cette thèse porte sur l'analyse des performances ultimes d'une OA-intégrée en présence de turbulence atmosphérique, basée sur le développement d'une méthode de contrôle originale pour l'architecture de PIC dédiés à la combinaison cohérente.

Dans une première étape, j'ai caractérisé les propriétés des signaux à combiner. Une analyse des propriétés statistiques des amplitudes complexes en sortie du démultiplexeur spatial m'a conduit à proposer une architecture simplifiée basée sur une correction de phase suivie d'une combinaison cohérente statique. Une telle architecture réduisant significativement les pertes dans le PIC, je l'ai retenue dans la suite de ma thèse. J'ai établi une expression analytique du temps de décorrélation des amplitudes complexes en sortie du démultiplexeur spatial. En appliquant cette expression au cas d'une liaison satellite-sol, j'ai mis en évidence que la bande passante typique des déphaseurs des PIC Si est trop limitée pour permettre un contrôle classique par modulation dans le cas d'un grand nombre d'entrées.

Pour surmonter cette contrainte, j'ai proposé une méthode originale pour d'estimation et de contrôle basée sur une modulation spatiale. Avec cette méthode, le PIC peut être vu comme un analyseur de surface d'onde qui permet d'estimer les phases résiduelles en une seule période de modulation. J'ai analysé le comportement de cette méthode en présence de bruit de mesure et j'ai optimisé la forme de la modulation spatiale vis-à-vis de ce critère. Le codage optimal permet à cette méthode d'atteindre la limite fondamentale de la propagation du bruit de photons des analyseurs de surface d'onde.

Sur la base des conclusions précédentes (correction phase seule, temps de décorrélation, codage spatial optimisé), j'ai défini les principaux paramètres d'une OA-intégrée dédiée à une liaison satellite-sol. A partir d'une expérience numérique, j'ai montré d'une part que cette méthode de contrôle permet la fermeture de la boucle, et d'autre part que la boucle est stable en présence de bruit de mesure représentatif de conditions réalistes. J'ai également proposé une architecture légèrement modifiée pour simplifier la loi de contrôle.

Finalement, j'ai mis en œuvre cette méthode de contrôle expérimentalement avec un PIC en Niobate de Lithium. J'ai montré que cette méthode est applicable à un PIC réel présentant des imperfections et mis en évidence son intérêt en comparant ses performances à celles de méthodes de modulation classique. Enfin, j'ai utilisé la caractérisation d'un PIC Si, à laquelle j'ai participé, pour définir un futur PIC avec des performances optimales.

### Mots clés :

Communications optiques en espace libre, Turbulence atmosphérique, Circuit photonique intégré, Optique adaptative