

# Élaboration de modèles de canal de propagation avec optique adaptative pour les liens optiques satellite-sol

Laurie Paillier<sup>1</sup> (laurie.paillier@onera.fr), Jean-Marc Conan<sup>1</sup>, Raphaël Le Bidan<sup>2</sup>, Géraldine Artaud<sup>3</sup>, Nicolas Védrenne<sup>1</sup>, Yves Jauouën<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ONERA, DOTA, Université Paris Saclay F-92322 Châtillon, France

<sup>2</sup> IMT-Atlantique, Lab-STICC, UBL, 29238 Brest, France

<sup>3</sup> CNES, 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

<sup>4</sup> LTI, Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris, 75013 Paris, France

Contexte



## Principaux avantages de l'optique par rapport aux radiofréquences :

- Consommation en puissance plus faible,
- Bande passante plus large : ~200 THz (optique) vs ~10 GHz (RF),
- Forte directivité.

## Modulation de phase et détection cohérente :

- Meilleure sensibilité et possibilité d'utilisation de formats de modulation plus complexes que pour la modulation et la détection d'intensité.

- Liens inter-satellites GEO – LEO opérationnels
- Liens expérimentaux sol – satellites utilisant la modulation de phase et la détection cohérente avec optique adaptative.

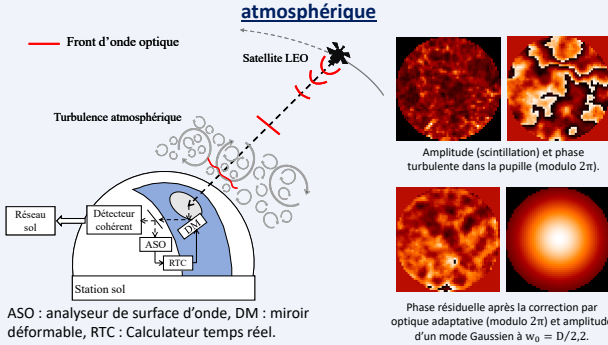
K. Saucke, C. Seiter, F. Heine, M. Gregory, D. Tröndle, E. Fischer, T. Berkefeld, M. Ferencik, I. Richter et al. "The testat transportable adaptive optical ground station," in *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII*, vol. 9739. International Society for Optics and Photonics, 2016, p.973906.

## Modulation Binary Phase shift Keying (BPSK)



Modélisation du canal et architecture de récepteur proposée

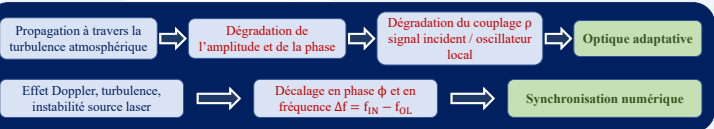
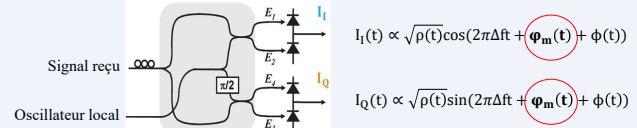
## Simulation end-to-end de la propagation à travers la turbulence atmosphérique



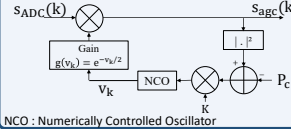
✓ Modélisation fine des effets de la turbulence sur l'onde optique grâce au logiciel Turandot développé par l'ONERA.

## Détection cohérente

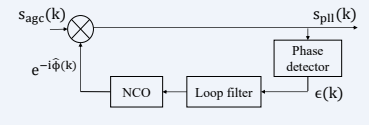
Objectif : retrouver l'information contenue dans la phase du signal sous la forme ici d'une modulation BPSK ( $\varphi_m$ ).



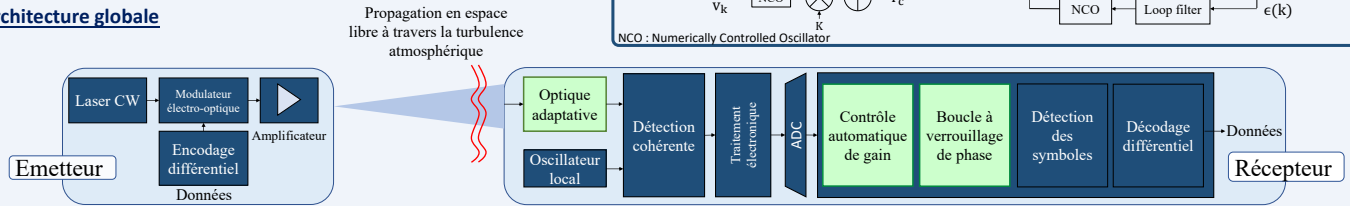
## Contrôle automatique de gain



## Boucle à verrouillage de phase



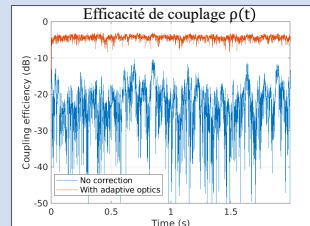
## Architecture globale



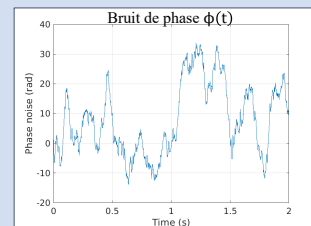
Exemple de Résultats

## Exemple de séries temporelles d'un lien LEO vers le sol

Elevation	20°	Indice de scintillation	0,68	$D_{RX}$	50cm
Paramètre de Fried	3,9cm	Vitesse de vent sol	10m/s	Fréquence boucle 5kHz	
Echelle externe	5m	Vitesse de vent haute altitude	20m/s	12 ordres radiaux (mode 91)	
$\lambda$	1550nm	Débit 10 Gbit/s		LEO 500km (à 20° 1200km)	

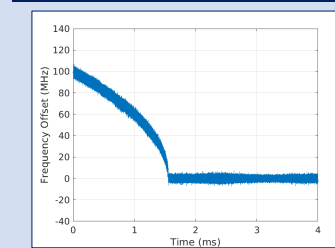


- Pénalité sur l'efficacité de couplage réduite (-23 dB à 4.5 dB)
- Réduction des fluctuations d'amplitude

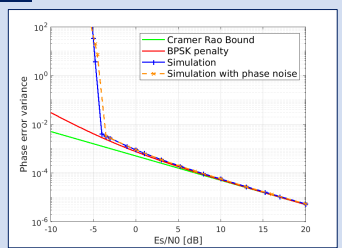


- Grandes variations (p-v ~47 rad)
- Temps de corrélation (70ms) >> Temps symbol (0.1ns)

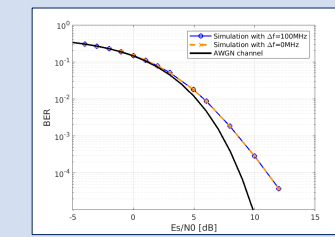
## Synchronisation en phase et en fréquence



Fréquence de la boucle	10 GHz
Facteur d'amortissement $\xi$	0,707
Fréquence propre $\omega_n$	9,3 MHz
Bande passante de boucle $B_L$	5 MHz

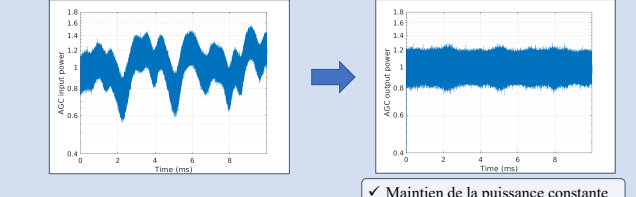


## Taux d'erreur binaire



- ✓ Convergence de la boucle à verrouillage de phase en 1,4 ms << temps de passage d'un satellite LEO.
- ✓ L'optique adaptative et la boucle de contrôle de gain permettent à la boucle à verrouillage de phase de fonctionner dans des conditions maîtrisées.
- ✓ L'étape de synchronisation n'a pas d'impact sur le taux d'erreur en bits. Cependant, les fluctuations d'amplitude résiduelles pénalisent la performance.

## Boucle de contrôle automatique de gain



- ✓ Modélisation fine de la propagation à travers la turbulence atmosphérique et de l'optique adaptative.
  - ✓ Proposition d'une architecture de récepteur adaptée à l'application, capable de rattraper un décalage en fréquence jusqu'à 100 MHz en quelques millisecondes.
  - ✓ Taux d'erreur binaire pénalisé par les fluctuations d'amplitude résiduelles mais pas par l'étape de synchronisation.
- L. Paillier et al., « Space-Ground Coherent Optical links: Ground Receiver Performance with adaptive optics and digital phase-locked loop » Journal of Lightwave Technology (soumis).  
 L. Paillier et al., « Adaptive optics assisted space-ground coherent optical links: ground receiver performance with digital phase-locked loop » IEEE International Conference on Space Optical Systems and applications (ICSOS), Portland, USA, 2019 (Proceeding et présentation orale).

## Perspectives

- Étude de la robustesse de la boucle à verrouillage de phase aux fluctuations d'amplitude dans des conditions de turbulence plus sévères.
- Comparaison à d'autres méthodes existantes de synchronisation de phase et fréquence.