

COUPLAGE ENTRE UN CHAMP TURBULENT ET UNE FIBRE OPTIQUE: APPLICATION DE MODES DE LAGUERRE-GAUSS

Luca Rinaldi¹, Vincent Michau¹, Mathieu Boutillier²

¹ DOTA, ONERA, Université Paris Saclay F-92320 Châtillon, France

² CNES, 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

luca.rinaldi@onera.fr

RÉSUMÉ

Atteindre des débits de l'ordre du gigabit par seconde et par canal sur un lien optique descendant satellite-sol, passe par le couplage du faisceau reçu dans une fibre monomode après correction par optique adaptative. L'utilisation d'une fibre multi-mode pourrait permettre de s'affranchir de cette correction. Nous étudions ici la mise en œuvre d'une telle fibre dans ce cadre.

MOTS-CLEFS : *Turbulence atmosphérique, Multi-plane light conversion, composants optique intégrée, lien optique satellite-sol*

1. INTRODUCTION

Dans le cas d'un lien à très haut débit, le signal optique, issu du satellite de télécommunication, et collecté par le télescope au sol, doit être focalisé dans une fibre mono-mode. La turbulence atmosphérique entraîne des variations de phase et d'amplitude aléatoires sur les faisceaux optiques, d'autant plus importantes que le satellite est bas sur l'horizon. Le couplage d'une onde optique perturbée par la turbulence dans une fibre mono-mode a déjà été caractérisé en détail, y compris en présence d'optique adaptative (voir [3]). L'objectif ici est d'étudier le couplage d'une telle onde dans une fibre optique multi-mode ou d'un MPLC [1] (Multi-Plane Light Conversion), le passage d'une fibre multi-mode à une fibre mono-mode étant traité par ailleurs.

Pour décrire les modes de la fibre, nous avons retenu les modes de Laguerre-Gauss, bien adaptés à la symétrie circulaire d'une pupille de télescope [2]. Nous avons considéré des ensembles de modes de Laguerre-Gauss caractérisés par leurs degrés radiaux, p , et azimutaux, l , tels que $0 \leq p \leq N-1$ et $0 \leq l \leq N-1$. $N-1$ représente le degré radial et azimutal maximum dans cet ensemble. Les modes seront notés LG_i , où l'indice, i , vaut $i = l + Np$. Le champ dans la pupille peut être projeté sur les N^2 modes de Laguerre-Gauss de l'ensemble considéré. Il s'écrit alors :

$$P_o \Psi_{turb} = \sum_{i=0}^{N^2-1} a_i LG_i + P_{res} \quad (1)$$

où P_o représente le support de la pupille du télescope et Ψ_{turb} , le champ incident. Les modes de Laguerre-Gauss sont supposés normalisés sur le plan.

Le couplage entre le champ dans la pupille, et un mode de Laguerre-Gauss, est caractérisé par l'intégrale de recouvrement normalisée :

$$S = \frac{\langle P_o \Psi_{turb} | LG_i \rangle}{(\langle P_o \Psi_{turb} | P_o \Psi_{turb} \rangle \times \langle LG_i | LG_i \rangle)^{1/2}} \quad (2)$$

En supposant les champs normalisés sur la pupille, l'expression 2 prend la forme simplifiée :

$$S = \langle P_o \Psi_{turb} | LG_i \rangle = a_i \quad (3)$$

Finalement, le couplage en intensité entre le champ turbulent dans la pupille et une fibre multi-modes, décrite par N^2 modes de Laguerre-Gauss vaut :

$$\eta = \sum_{i=0}^{N^2-1} |a_i|^2. \quad (4)$$

La section 2 est dédiée à la caractérisation du couplage dans le cas où le champ n'est pas perturbé par la turbulence atmosphérique. L'impact de la turbulence est traité dans la section 3.

2. CAS D'UNE ONDE PLANE INCIDENTE

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier le terme de couplage η en fonction des paramètres des modes de Laguerre-Gauss. Nous supposons que la pupille se trouve dans le plan du waist, pour éliminer le terme de courbure statique absent dans le champ incident. L'amplitude d'un mode de degré radial p et azimutal l est donc proportionnelle à :

$$LG_{pl} \propto \frac{1}{w} \left[\sqrt{2} \frac{r}{w} \right]^l L_{pl} \left(\frac{2r^2}{w^2} \right) e^{-\frac{r^2}{w^2}} e^{jl\phi} \quad (5)$$

où L est le polynôme de Laguerre de degré p , w la dimension du waist et (r, ϕ) sont les coordonnées polaires d'un point dans la pupille. Les principaux paramètres jouant sur le taux de couplage sont donc la dimension du waist relativement à la pupille et le nombre de modes.

La Figure 1 présente la variation de η dans le cas d'une pupille pleine, en fonction de $\frac{D}{2w}$, où D est la dimension physique de la pupille, pour les ensembles de modes de Laguerre-Gauss tels que $1 \leq N^2 \leq 49$.

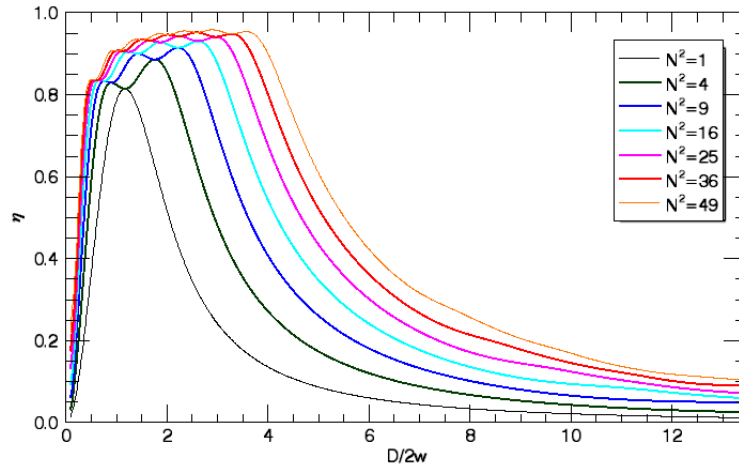


FIGURE 1 : Taux de couplage en fonction du waist normalisé par le diamètre de la pupille, en considérant des ensembles de modes de Laguerre-Gauss de nombres croissants (N : degré radial/azimutal maximum). cas d'une pupille pleine

Le cas $N = 1$ correspond au mode gaussien. On retrouve la valeur classique de couplage maximum d'un faisceau gaussien dans une pupille circulaire, 82%. Un couplage supérieur à 90% peut être obtenu pour $N^2 = 9$. Comme la pupille est à symétrie de révolution, seuls les modes de fréquence azimutale nulle sont excités.

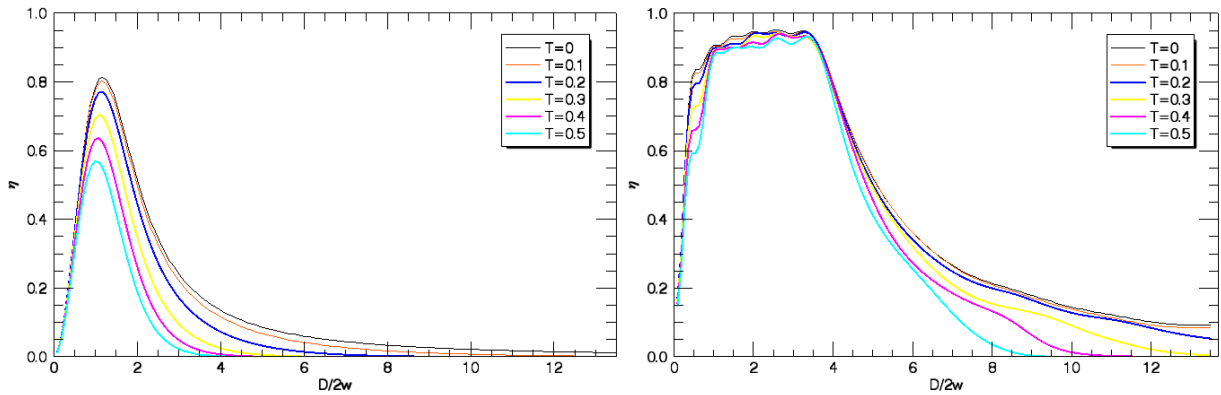


FIGURE 2 : Taux de couplage avec pupille annulaire en fonction du diamètre normalisé par le waist, pour différents taux d'occultation, notés T . Faisceau gaussien (à gauche), 36 premiers modes de Laguerre-Gauss (à droite).

La valeur de η en présence d'une occultation centrale est présentée sur la Figure 2. Pour le seul mode gaussien, l'introduction d'une occultation centrale de 50% fait passer le taux de couplage η , de 0,82 à 0,5. En revanche, avec 36 modes de Laguerre-Gauss ($N=6$), l'effet de l'occultation centrale n'est pas significatif, tant que l'occultation est inférieure à 40%.

3. CAS D'UNE ONDE INCIDENTE PERTURBÉE PAR LA TURBULENCE

En s'appuyant sur un code modélisant la propagation optique à travers la turbulence atmosphérique [4], nous avons simulé 40 amplitudes complexes. La propagation, correspondant à un trajet géostationnaire-sol à 30° d'élévation, est caractérisée par les valeurs du paramètre de Fried et du taux de scintillation, respectivement, $r_o = 6,9 \text{ cm}$ et $\sigma_\chi^2 = 0,086$ à $\lambda = 1550 \text{ nm}$. La pupille de réception est supposée pleine, de diamètre 25 cm. Nous avons calculé le taux de couplage sur 49 modes de LG suivant l'équation 3, en choisissant une configuration où le taux de couplage est bon en l'absence de turbulence, $\frac{D}{2w} = 3,6$ (cf. Fig. 1). La Figure 3 présente les $\langle |a_i|^2 \rangle$, calculés sur les 40 réalisations ainsi que l'efficacité de couplage cumulée. Le taux de couplage maximum, 54 % est atteint avec une dizaine de degrés de liberté.

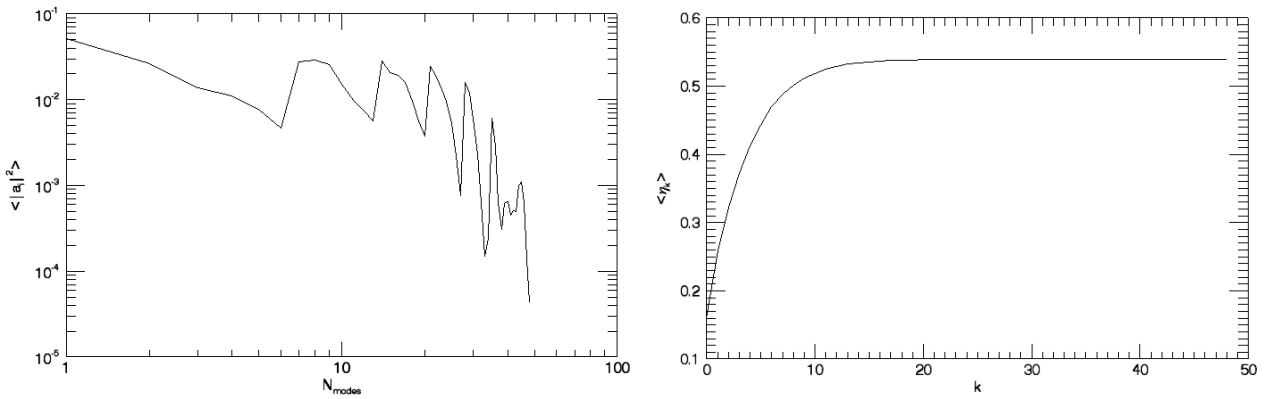


FIGURE 3 : Taux de couplage : par mode de LG (gauche), cumulé (droite) $\langle \eta_k \rangle = \sum_{j=0}^k \lambda_j$, λ_j valeurs propres de la matrice de covariance des a_i . Lien satellite géostationnaire-sol, 30° d'élévation.

CONCLUSION

Le couplage entre une pupille circulaire/annulaire et les modes Laguerre-Gaussien a été caractérisé dans le cas d'une onde plane incidente. Nous avons mis en évidence qu'il est possible d'obtenir un taux de couplage supérieur à 90 % avec 6 modes radiaux, y compris en présence d'une obturation centrale. Une première simulation a permis d'évaluer l'efficacité d'un tel composant dans le cas d'une onde perturbée par la turbulence atmosphérique, dans des conditions représentatives d'un lien géostationnaire-sol. Ces études préliminaires constituent une première étape avant le développement d'un composant permettant de compenser les distorsions d'amplitude et de phase induites par la turbulence atmosphérique.

RÉFÉRENCES

- [1] S. Bade, B. Denolle, G. Trunet, N. Riguet, Pu Jian, O. Pinel, G. Labroille, "Fabrication and Characterization of a Mode-selective 45-Mode Spatial Multiplexer based on Multi-Plane Light Conversion" *CAILabs*, 38 boulevard Albert 1er, Rennes, France, Optical Fiber Communication Conference, 2018.
- [2] L. Li, G. Xie, Y. Yan, Y. Ren, P Liao, Z. Zhao, N. Ahmed, Z. Wang, C. Bao, A. J. Willner, S. Ashrafi, M. Tur, and A. E. Willner, "Power loss mitigation of orbital-angular-momentum-multiplexed free-space optical links using nonzero radial index Laguerre-Gaussian beams" *Journal of the Optical Society of America B*, Vol.34, No.1, January 2017.
- [3] C. Ruilier, F. Cassaing, "Coupling of a large telescope and single-mode waveguides : application to stellar interferometry" *Journal of the Optical Society of America A*, Vol.18, No.1, January 2001.
- [4] N. Védrenne, J.-M. Conan, M.T. Velluet, M. Séchaud, M. Toyoshima, H. Takenada, A. Guérin and F. Lacoste "Turbulence effects on bi-directional ground-to-satellite laser communication systems" *ICSO proceedings. International Conference on Space Optical System and Applications (ICSO)*, 9-12 September 2012, Ajaccio (France).