

Combinaison cohérente de sources laser fibrées pour la compensation de la turbulence atmosphérique

P. Bourdon, V. Jolivet, B. Bennaï, L. Lombard,
D. Goular, G. Canat et O. Vasseur (ONERA/DOTA)



return on innovation

Pourquoi la combinaison de lasers ?

- Montée en puissance des lasers à fibres continus
 - Jusqu'à 3 kW proche de la limite de diffraction démontrés (IPG Photonics 2008)
 - Mais polarisation aléatoire, large bande spectrale, utilisation de fibres microstructurées = très sensibles à la courbure
- Effets physiques limitant la montée en puissance des amplificateurs à fibre
 - Effets thermiques
 - Effets non linéaires (diffusions Brillouin et Raman stimulées)
 - Limites au couplage des diodes de pompe
 - Seuil de dommage en surface

→ 36 kW pour un laser Yb:fibre continu

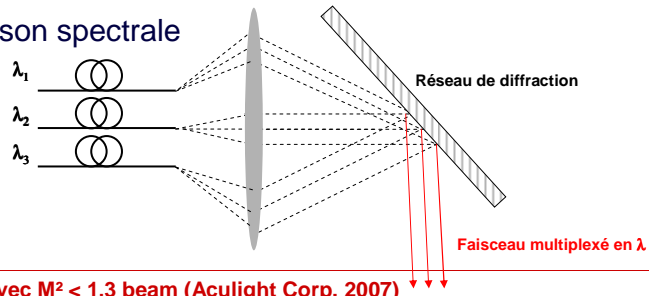
→ 10 kW en prenant en compte l'enroulement des fibres

→ 2 kW pour un laser Yb:fibre continu fin spectralement

J.W. Dawson et al. (LLNL), *Optics Express* vol. 16, pp. 13240-13266 (2008)

Combinaison incohérente de faisceaux laser

- Superposition de faisceaux avec des polarisations ou des longueurs d'ondes **différentes** (\rightarrow sans interférences)
- Combinaison spectrale



- 522 W combinés avec $M^2 < 1,3$ beam (Aculight Corp. 2007)
 - tenue au flux laser de l'élément diffractif = point dur principal (les réseaux de Bragg en volume développés par l'Univ. of Central Florida ont des très bonnes tenues au flux)
 - spectre émis large bande (peigne de fréquences)
 - configuration géométrique et procédure d'alignement sont complexes
- \rightarrow technique limitée à environ 10 sources

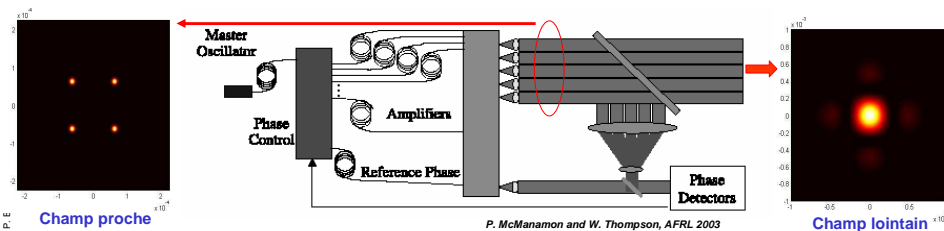
2011/2008 - JRDCA - Session Application Laser, P. Bourdon, ONERA/DOFA

3

ONERA
Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

Combinaison cohérente de faisceaux laser

- Superposition de faisceaux avec les **mêmes** polarisation et longueurs d'onde (\rightarrow interférences constructives par contrôle)
- Combinaison cohérente par contrôle actif de la phase



- 470 W combinés avec un faible M^2 (Northrop Grumman 2006)
 - 48 fibres faible puissance combinées (MIT Lincoln Lab 2006)
- Le découpage en sous-pupilles et le contrôle de la phase de chaque sous-pupille donne la possibilité de contrôler la forme du front d'onde combiné \rightarrow micro-déviations de faisceau (beam steering), compensation d'aberrations (ex. turbulence atmosphérique)

2011/2008 - JRDCA - Session Application Laser, P. E

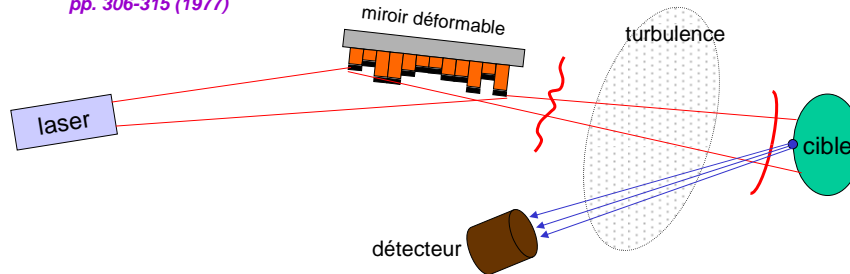
4

ONERA
Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

COAT – Coherent Optical Adaptive Techniques

- COAT = Dénomination introduite dans les années 1970 - 1980

T.R. O'Meara, « The multidither principle in adaptive optics » J. Opt. Soc. Am. vol. 67, n°3, pp. 306-315 (1977)



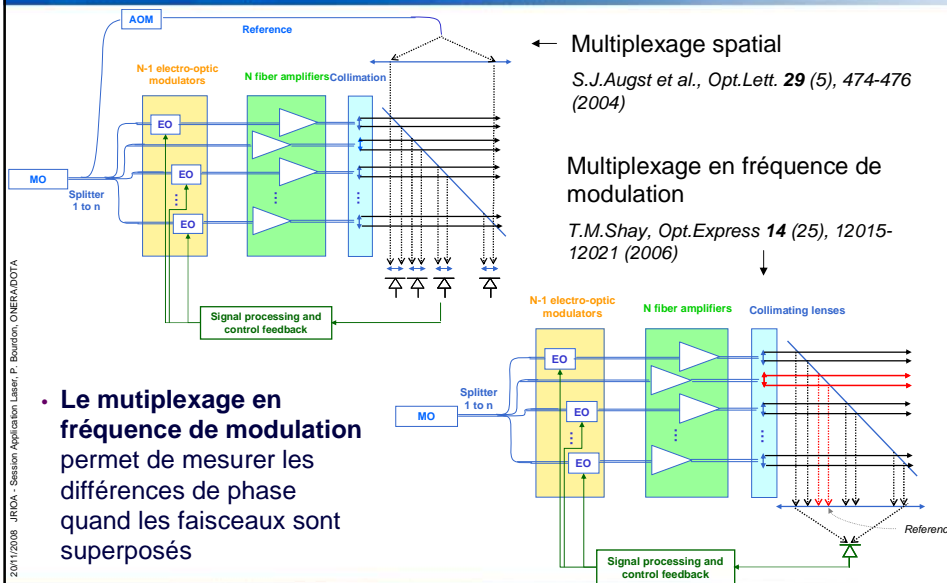
- techniques d'optique adaptative appliquées aux sources lumineuses cohérentes
- objectif = maximisation de la densité de puissance déposée sur la cible
- maximisation du flux rétrodifféchi / rétrodiffusé par une cible ponctuelle spéculaire (« glint target »)
- tracking de cible démontré
- utilisation d'un unique faisceau laser et du flux rétrodiffusé par la cible
→ pas d'anisoplanétisme

2011/2008 JRDCA - Session Application Laser, P. Bourdon, ONERA/DOFA

5

ONERA
Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

Techniques de combinaison cohérente par contrôle actif de la phase



← Multiplexage spatial

S.J. Augst et al., Opt.Lett. 29 (5), 474-476 (2004)

Multiplexage en fréquence de modulation

T.M. Shay, Opt.Express 14 (25), 12015-12021 (2006)

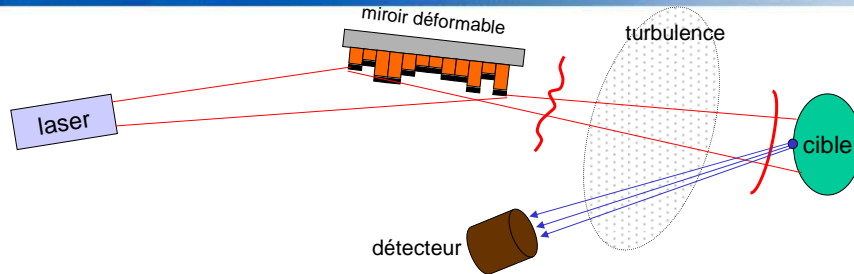
- Le mutiplexage en fréquence de modulation permet de mesurer les différences de phase quand les faisceaux sont superposés

2011/2008 JRDCA - Session Application Laser, P. Bourdon, ONERA/DOFA

6

ONERA
Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

COAT – Coherent Optical Adaptive Techniques



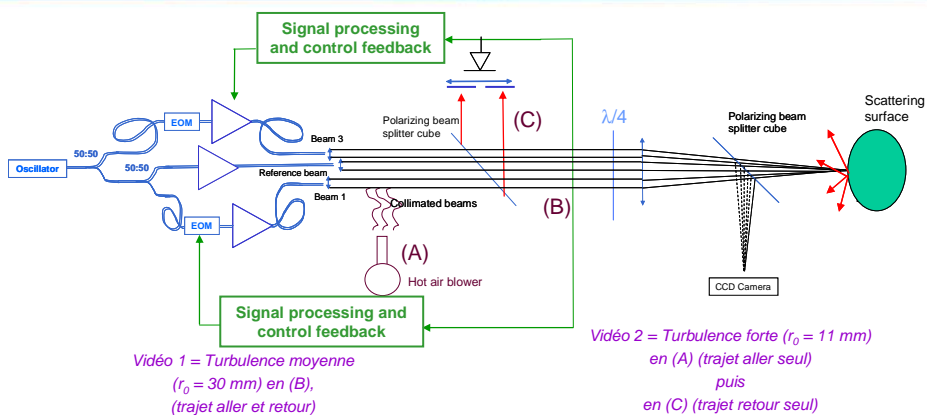
- Multi-dithering = déformation différentielle de la surface pour mesurer le gradient de la déformation du front d'onde qui constitue le signal d'erreur pour l'asservissement
→ *technique lente, difficilement applicable sur le terrain*
- Multiplexage de modulation = application de fréquences de modulation différentes sur chaque sous-pupille
→ *technique plus rapide, mais sensible aux turbulences retour*

2011/2008 - JRDCA - Session Application Laser, P. Bourdon, ONERA/DOFA

7

ONERA
Office National de la Recherche Aérospatiale

Combinaison cohérente sur une cible diffusante à travers la turbulence – technique développée à l'Onera



- Première démonstration de combinaison cohérente de lasers à travers la turbulence en utilisant le signal rétrodiffusé par la cible

- Très faible sensibilité à la turbulence retour

2011/2008 - JRDCA - Session Application Laser, P. Bourdon, ONERA/DOFA

8

ONERA
Office National de la Recherche Aérospatiale

Combinaison cohérente sur une cible diffusante à travers la turbulence – technique développée à l'Onera

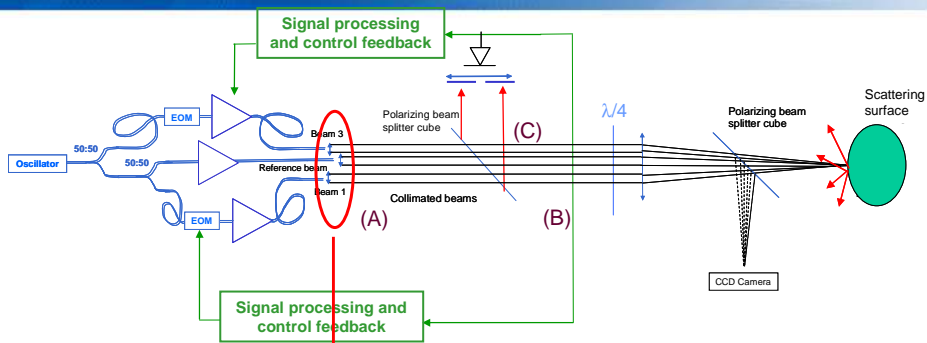
- Combinaison cohérente de 3 amplificateurs à fibres continus de puissance 2 W en utilisant le multiplexage de fréquence de modulation. **En l'absence de propagation turbulente**, la différence de phase résiduelle est de $\lambda/30$.
- La précompensation de la **turbulence** a été démontrée pour des turbulences équivalentes à un $C_n^2 = 10^{-14}$ sur un **kilomètre de distance** de propagation.
- Pour la première fois, la combinaison cohérente d'amplificateurs à fibres sur une surface diffusante après propagation turbulente en utilisant le signal rétrodiffusé par la surface a été démontrée. Dans ce cas, la différence de phase résiduelle obtenue est de $\lambda/15$.

2011/2008 - JRDCA - Session Application Laser, P. Bourdon, ONERA/DO7A

9

ONERA
Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques

Combinaison cohérente sur une cible diffusante à travers la turbulence – analyse théorique



Signal d'erreur démodulé à la fréquence ν_i :

$$S_{si-j} = 2 R_{PD} J_1(\beta_i) \left[\begin{array}{l} \sqrt{P_{us} P_{is}} \sin(\phi_u - \phi_i) \\ + \sum_{j=1}^N J_0(\beta_j) \sqrt{P_{js} P_{is}} \sin(\phi_j - \phi_i) \end{array} \right]$$

Φ_u = phase en sortie du laser non modulé (u = unmodulated)

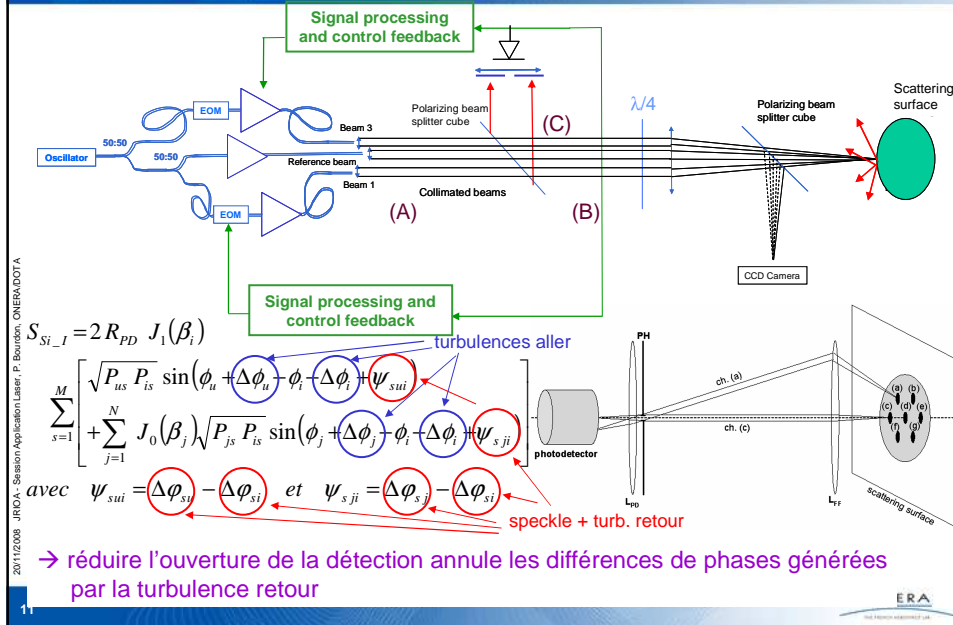
Φ_i = phase en sortie de la $i^{\text{ème}}$ voie laser

2011/2008 - JRDCA - Session Application Laser, P. Bourdon, ONERA/DO7A

10

ONERA
Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques

Combinaison cohérente sur une cible diffusante à travers la turbulence – analyse théorique



Conclusion

- La combinaison cohérente sur cible diffuse à travers la turbulence repose sur la **réduction de l'ouverture du système de détection** → sensibilité réduite aux turbulences retour
- Configuration optique Onera = réduction de l'ouverture sans réduire le champ du détecteur → optimise le flux reçu par le détecteur
- Cette technique COAT permet de « traiter » des cibles de natures très variées (du diffuseur Lambertien au spéculaire)
- Elle permet de définir des architectures système simplifiées → utilisation d'un unique laser pour la mesure de turbulence et le dépôt de puissance sur cible

Perspectives

- Réalisation d' expériences en turbulence quantifiée
- Essais terrain
- Extension de la technique à des cibles mobiles
- Combinaison de sources fibrées de plus forte puissance
- Amélioration de la bande passante de l'asservissement (> 100 kHz)