

JRIOA – Nantes, 19-20 novembre 2008

Atténuation des effets de la turbulence par optique adaptative pour les communications en espace libre

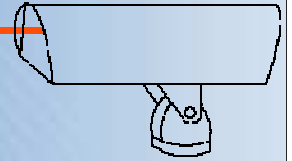
Noah Schwartz (Onera)

V. Michau (Onera), J. Borgnino (Université de Nice), F. Chazallet (Shaktiware)



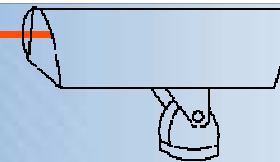
retour sur innovation

Plan de l'exposé

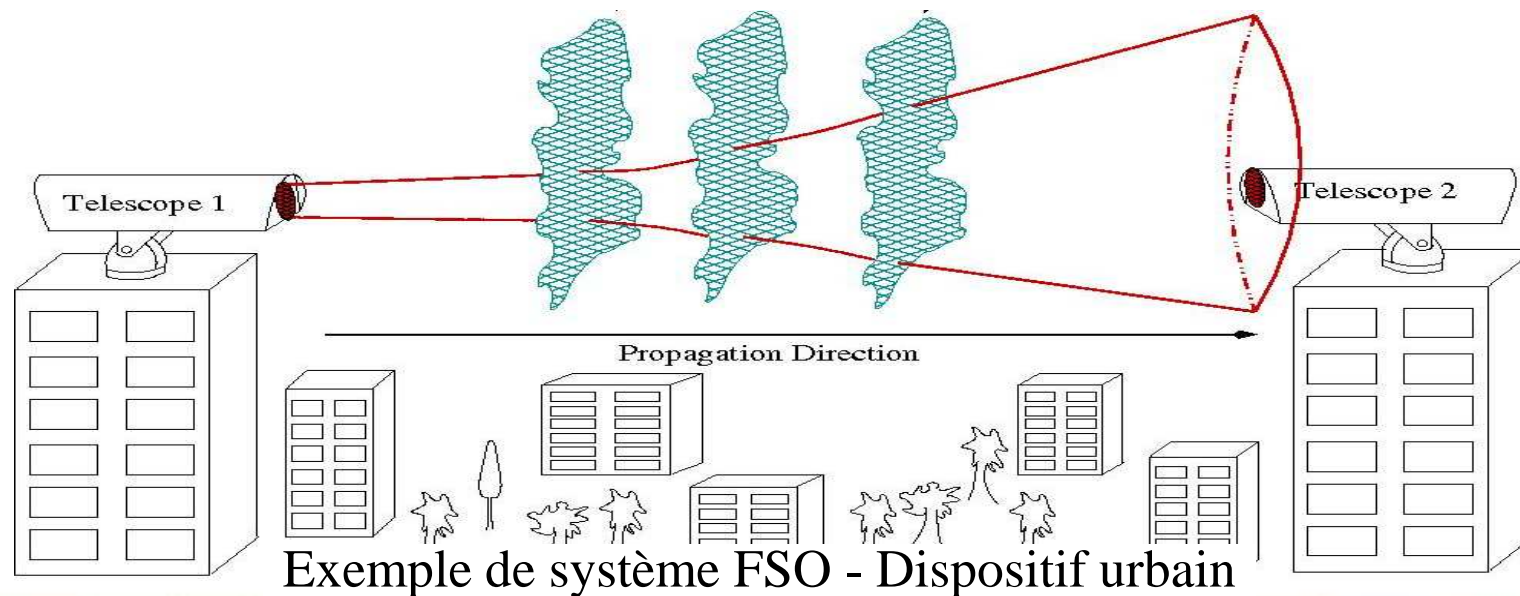


- 1. Les systèmes FSO**
- 2. Effets de la turbulence atmosphérique**
- 3. Contexte de l'étude : Fortune 43G**
- 4. Principe de correction : solution optimale**
- 5. Comparaison des corrections par optique adaptative**
- 6. Conclusion et perspectives**

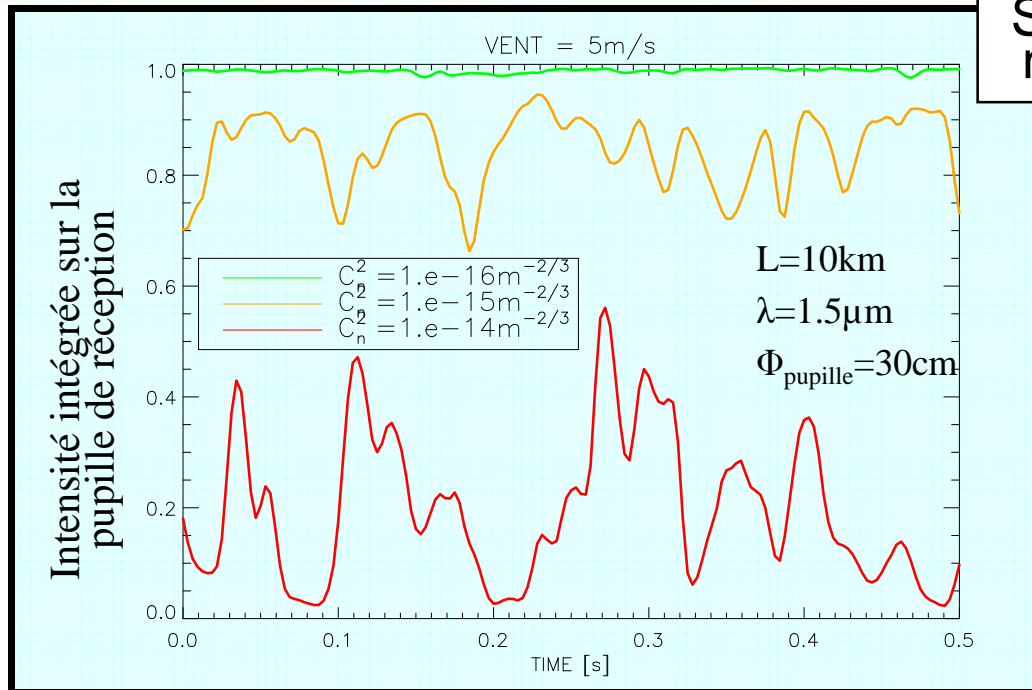
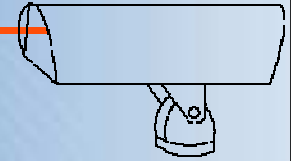
Les FSO - Introduction



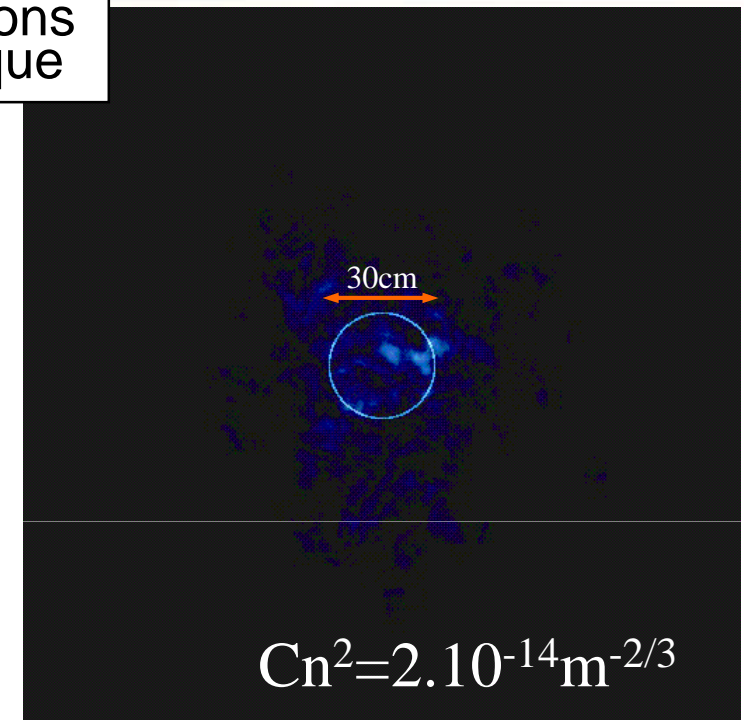
- ✓ FSO = Free-Space Optics
- ✓ Communications optique utilisant la propagation de la lumière en espace libre pour transmettre des données entre 2 points.
- ✓ Avantages : Haut débit possible, pas d'allocation de fréquence, intrinsèquement sécurisé, pas d'interférences, facilité de déploiement.
- ✓ Inconvénients : Sensibilité aux conditions atmosphérique.
- ✓ Systèmes existants : Courtes distances.



Les FSO - Effet de la turbulence



Simulations
numérique



Effets de la turbulence atmosphérique :

- Mouvements aléatoire du faisceau (**Beam wander**).
- Élargissement du faisceau au delà diffraction (**Beam spreading**).
- Fluctuations spatiales et temporelles (**Scintillation**).
- Fluctuations d'intensité (**Fades**) et réduction de l'intensité moyenne.

Les FSO - Correction des effets de la turbulence



✓ Le BER est directement lié au rapport signal à bruit : $BER(t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{SNR(t)}{2\sqrt{2}}\right)$

✓ Les FSO sont limités par les fluctuations d'intensité.

✓ Liaison haut débit, longue distance :

➔ Stabiliser le faisceau à la réception pour minimiser le BER.

But de la correction : Minimiser les fluctuations et maximiser le flux à la réception.

✓ Les fluctuations d'intensité sont dues aux défauts de phase introduits le long du trajet de propagation :

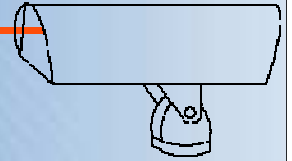
➔ Modulation en temps réel de la phase à l'émission (optique adaptative).

Métriques:

- Intensité moyenne : $\langle I \rangle$

- Fluctuations d'intensité : $\frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}$

Contexte - Projet Fortune 43G



Contexte : Système FSO → Fortune 43G

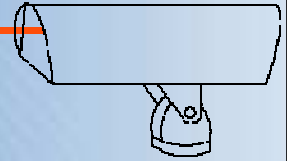
Consortium : *Shaktiware* (leader), ONERA (OA + turbulence), OKO Tech. (miroir déformable), Turkcell (télécom).

Spécifications :

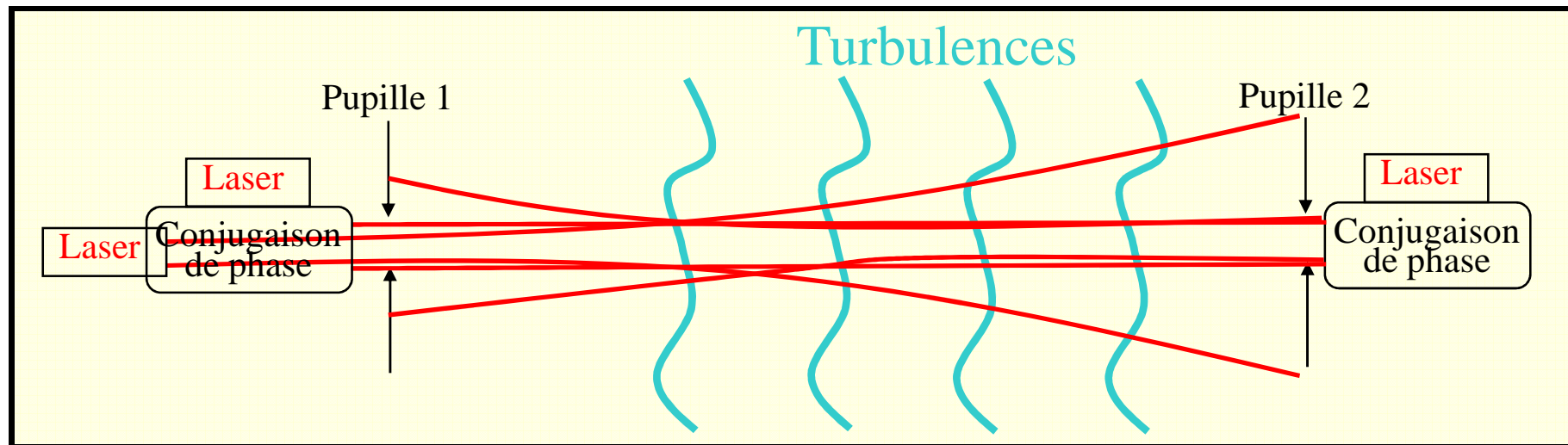
- ✓ Débit : 1Gbits/s (objectif)
- ✓ Distance : $L = 10\text{km}$ (objectif)
- ✓ Diamètre pupille : $D \leq 25\text{-}30\text{cm}$ (minimisation de l'encombrement)
- ✓ Longueur d'onde : $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ (Télécom, sécurité oculaire, maturité technologique)

→ Les résultats présentés auront pour cadre F34G.

Correction - Correction optimale (1)



Quelle limite peut-on fixer à la qualité de la correction par optique adaptative?

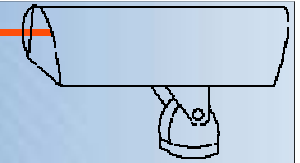


But: Création d'un «mode» de propagation :

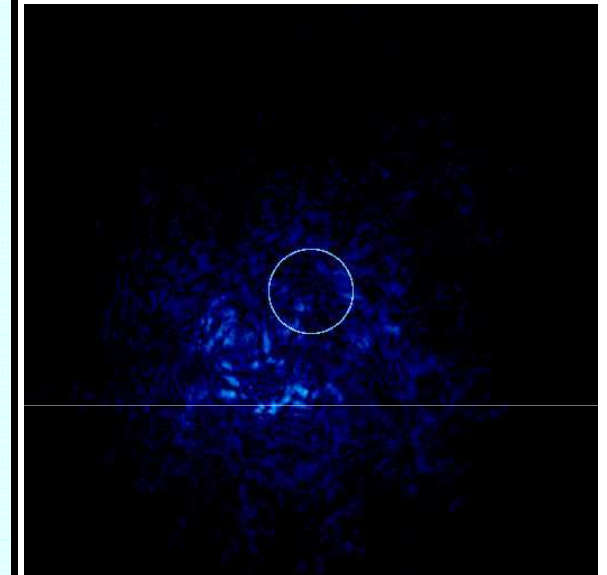
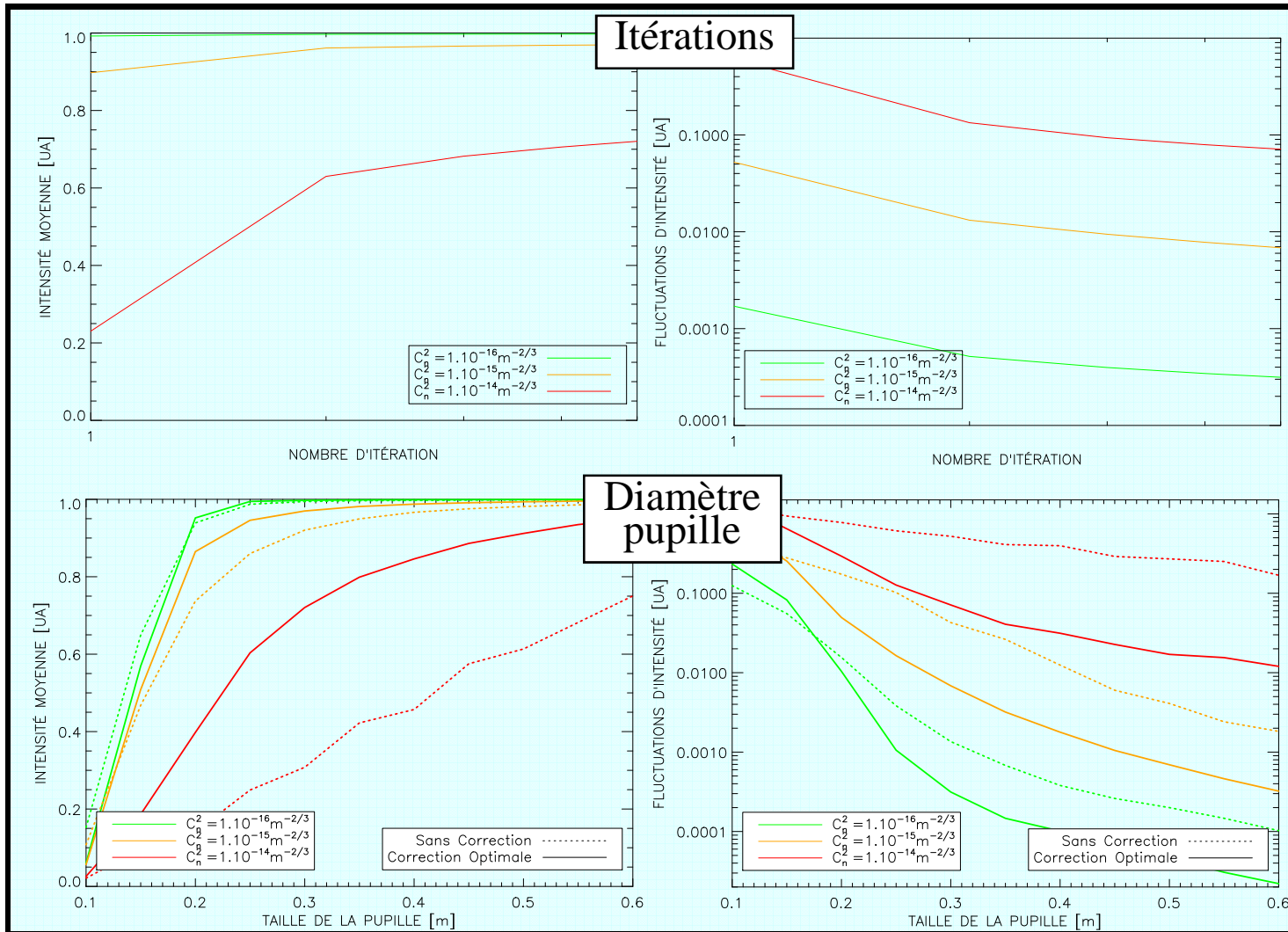
Pupille 1 - Turbulence atmosphérique - Pupille 2.

- ✓ Approche itérative (pseudo-cavité résonante).
- ✓ Conjugaison de phase : correction de la phase et de l'amplitude du champ.
- ✓ Convergence vers un mode de propagation.

Correction - Correction optimale (2)



Résultat de la correction - conjugaison de phase itérative



Conditions de propagation:

$L=10\text{km}$

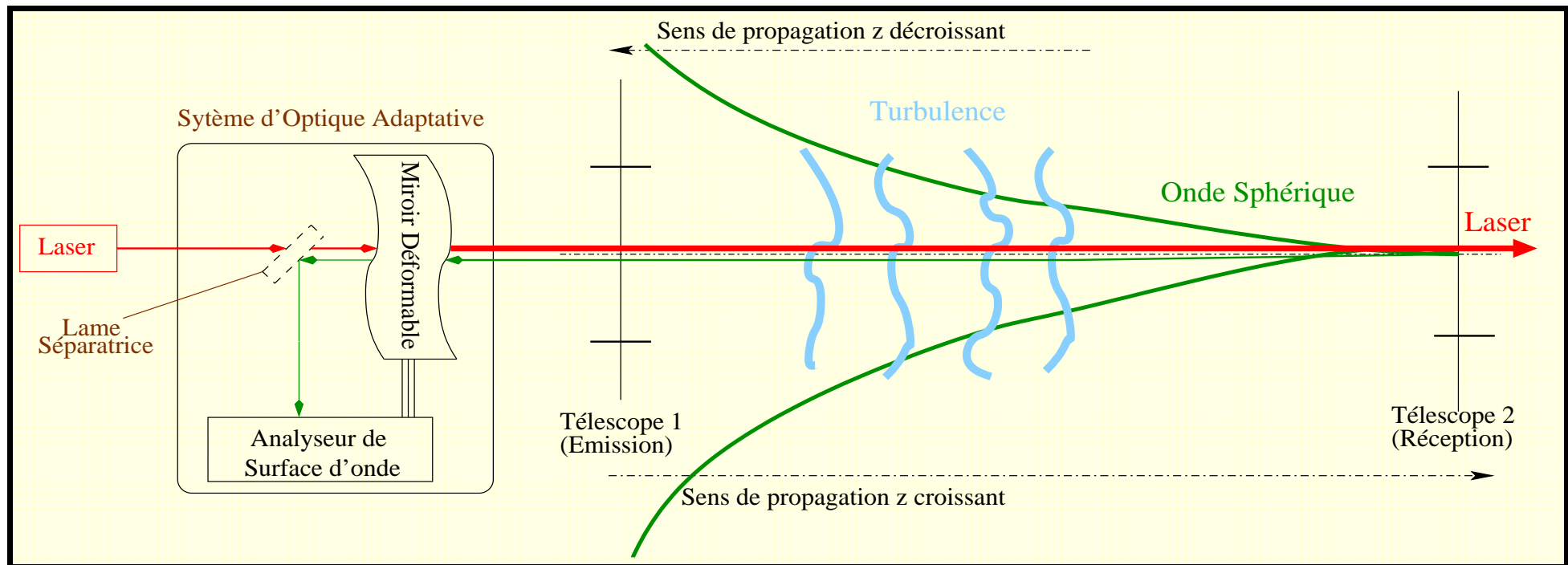
$\lambda=1.5\mu\text{m}$

$\Phi_{\text{pupille}}=30\text{cm}$

Correction - Solution (1)



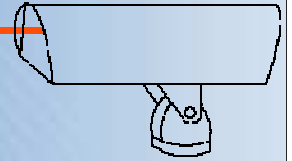
Analyse de surface d'onde :



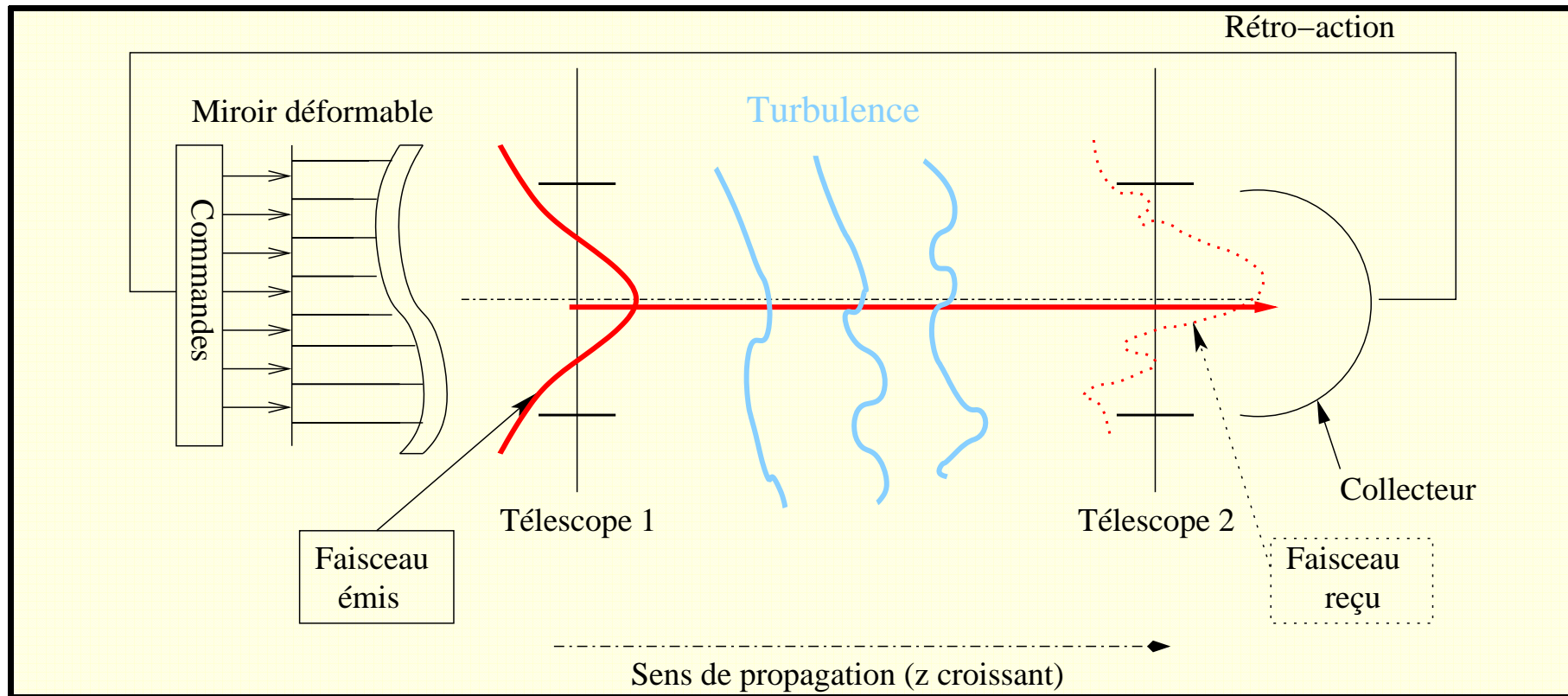
- ✓ **Analyse de surface d'onde** sur onde sphérique se propageant en sens inverse.
- ✓ Correction uniquement de la phase.

Raymond M. Sova, Joseph E. Sluz, David W. Young, Juan C. Juarez, Anurag Dwivedi, Nickolas M. Demidovich, III, J. E. Graves, Malcolm Northcott, Jeff Douglass, John Phillips, Don Driver, Andy McClarin, Dave Abelson, "80 Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal," *Proc. of SPIE* Vol. 6304, 2006.

Correction - Solution (2)



Modulation de phase (dithering) :



✓ Optimisation du flux collecté par **modulation de phase**.

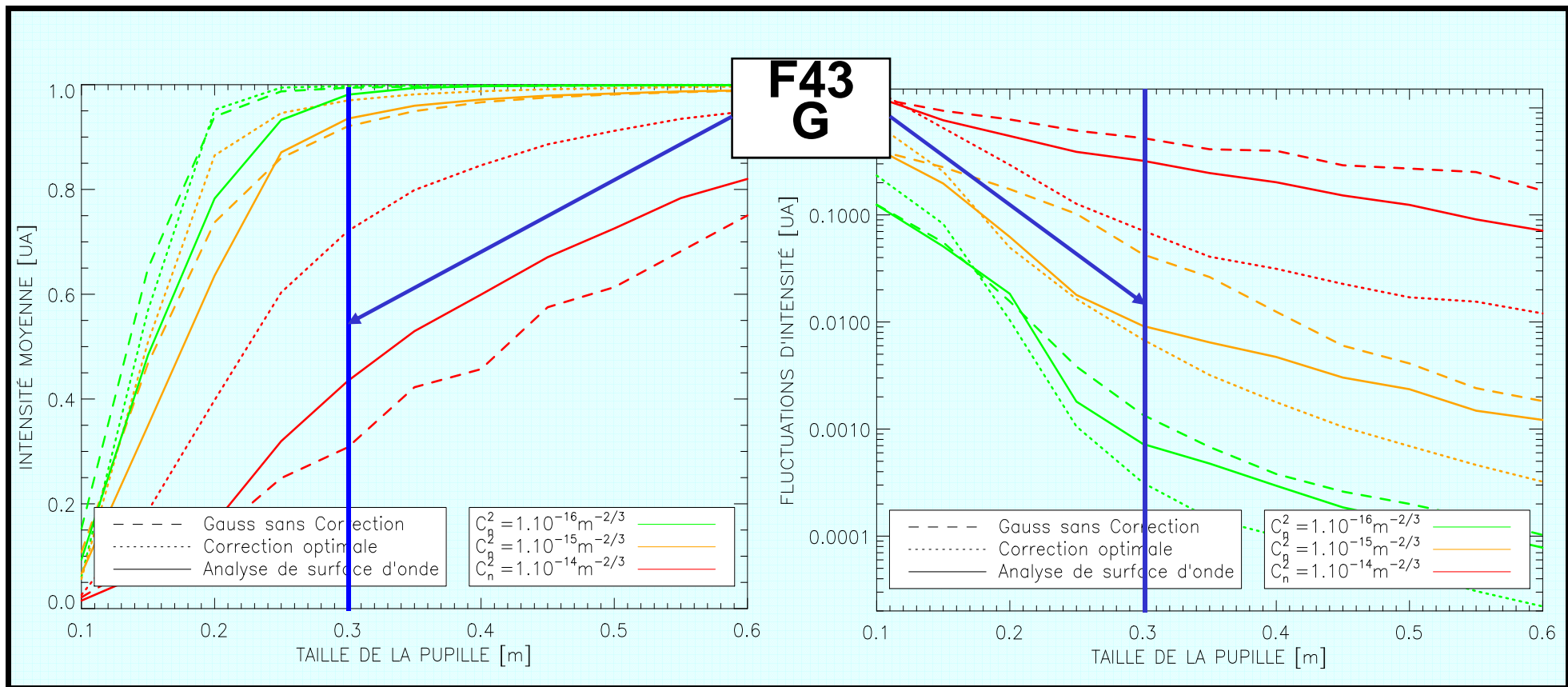
M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, and J. C. Ricklin, "Adaptive phase-distortion based on parallel gradient-descent optimization," *Optics Letters*, vol. 22, no. 12, pp. 907-909, Jun. 1997.

Simulations - Solution (1)

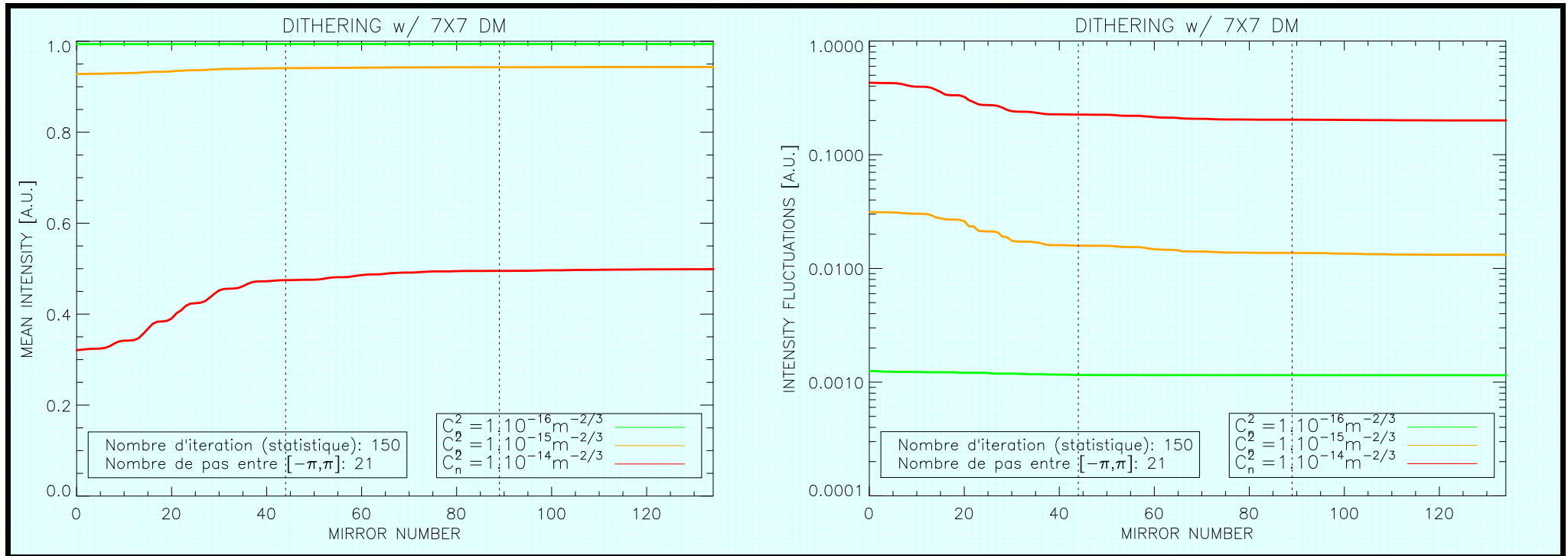
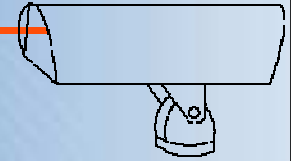


Correction avec analyse de surface d'onde:

✓ Shack-Hartmann avec 7x7 sous-pupilles



Simulations – Solution (2)

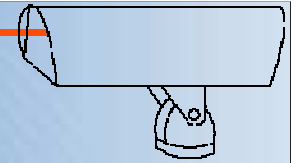


- ✓ Modulation de phase à l'émission en piston.
- ✓ Miroir à 7 par 7 segments.
- ✓ Optimisation pas à pas de l'intensité à la réception
- ✓ Plus le nombre de segments est important, meilleur est la correction.

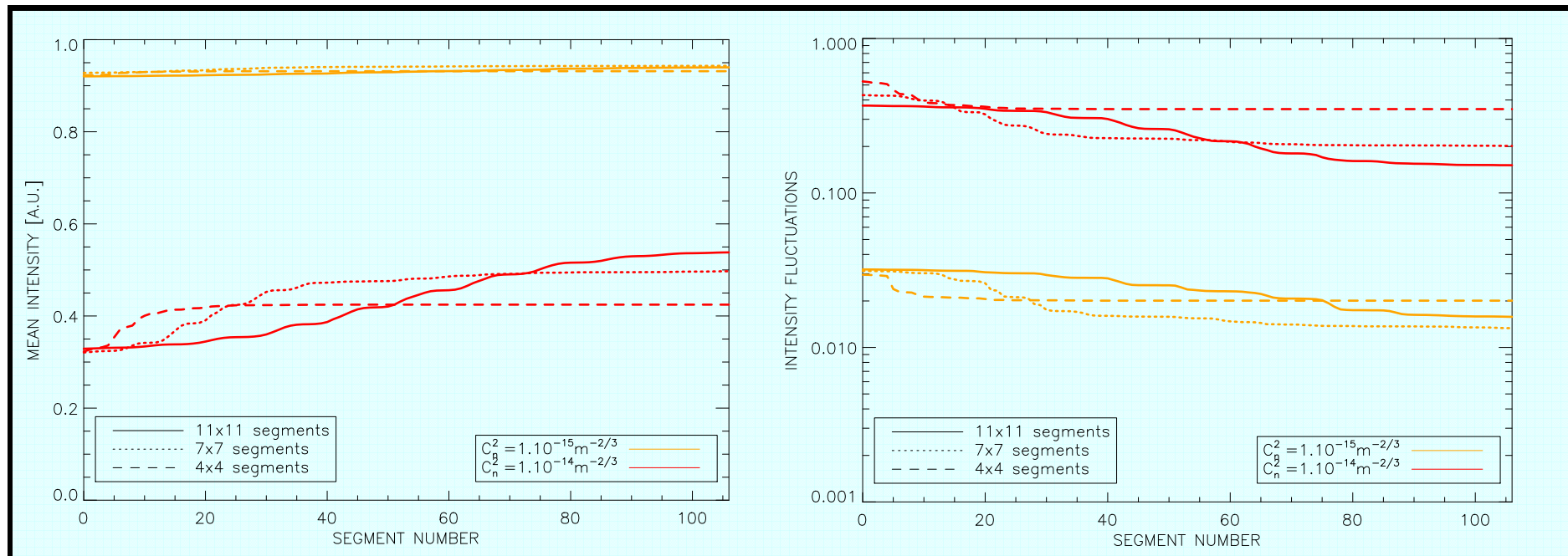
Géométrie du miroir

	10	16	22	28	
4	9	15	21	27	33
3	8	14	20	26	32
2	7	13	19	25	31
1	6	12	18	24	30
	5	11	17	23	

Simulations – Solution (2)



Modulation de phase: Influence du nombre de segments

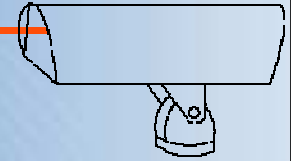


Nombre de segments	4x4	7x7	11x11
$Cn2 = 1.10^{-15} m^{-2/3}$	0.9315 0.0020	0.9434 0.0132	0.9399 0.0157
$Cn2 = 1.10^{-14} m^{-2/3}$	0.4246 0.3491	0.4987 0.2002	0.5382 0.1512

Intensité moyenne : $\langle I \rangle$

Fluctuations d'intensité : $\frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}$

Simulations - Comparatif



$Cn^2 [m^{-2/3}]$	Sans correction	Correction optimale	Analyseur SH (7x7)	Dithering (7x7)
1.10^{-15}	0.9204 0.0428	0.9699 0.0068	0.9352 0.0092	0.9434 0.0132
1.10^{-14}	0.3079 0.5221	0.7205 0.0713	0.4345 0.3205	0.4987 0.2002

Intensité moyenne : $\langle I \rangle$

Fluctuations d'intensité : $\frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}$

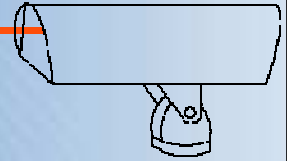
Conditions de propagation:

$L=10\text{km}$

$\lambda=1.5\mu\text{m}$

$\Phi_{\text{pupille}}=30\text{cm}$

Conclusion et perspective



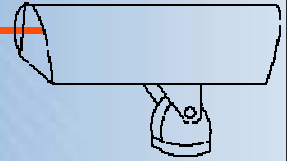
Conclusions

- ✓ Efficacité de la correction par OA pour F43G démontrée par simulation numérique.
- ✓ Comparaison de deux concepts d'OA : la modulation de phase ('dithering') et la mesure de front d'onde donnent des résultats très proches.

Perspectives

- ✓ Etude de l'implantation des deux concepts (dimensionnement pour F43G) :
 - ✓ Influence du bruit de détection
 - ✓ Vitesse de convergence pour la modulation de phase
- ✓ Validation expérimentale en laboratoire du concept retenu.

Simulations - Comparatif

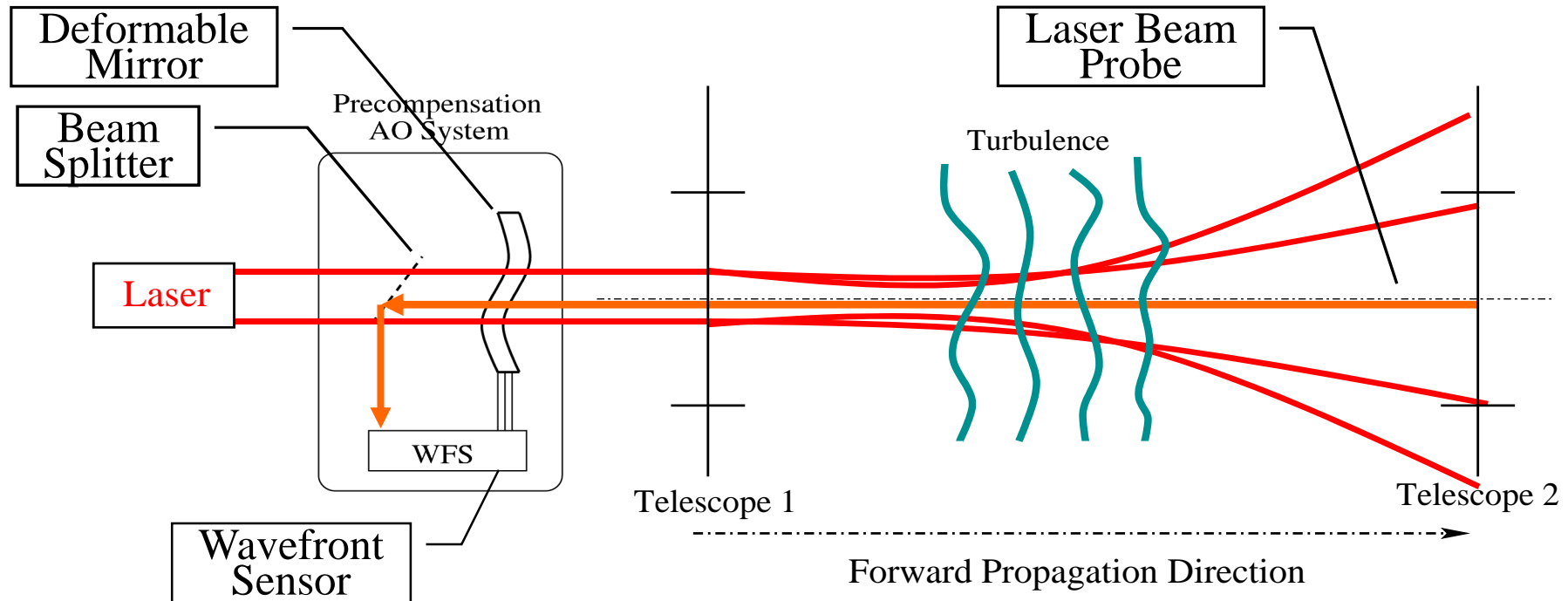


$Cn^2 [m^{-2/3}]$	Sans correction	Correction optimale	Itératif + PO	Itératif + PO + SH	Onde sphérique + analyseur parfait	Onde sphérique + analyseur SH	Dithering (7x7)
1.10^{-16}	0.9942 0.0014	0.9974 0.0003	0.9961 0.0007	0.9942 0.0012	0.9813 0.0006	0.9808 0.0007	0.9938 0.0011
1.10^{-15}	0.9204 0.0428	0.9699 0.0068	0.9615 0.0098	0.9516 0.0104	0.9321 0.0138	0.9352 0.0092	0.9434 0.0132
1.10^{-14}	0.3079 0.5221	0.7205 0.0713	0.6369 0.1568	0.4052 0.4256	0.4591 0.2506	0.4345 0.3205	0.4987 0.2002

Intensité moyenne : $\langle I \rangle$

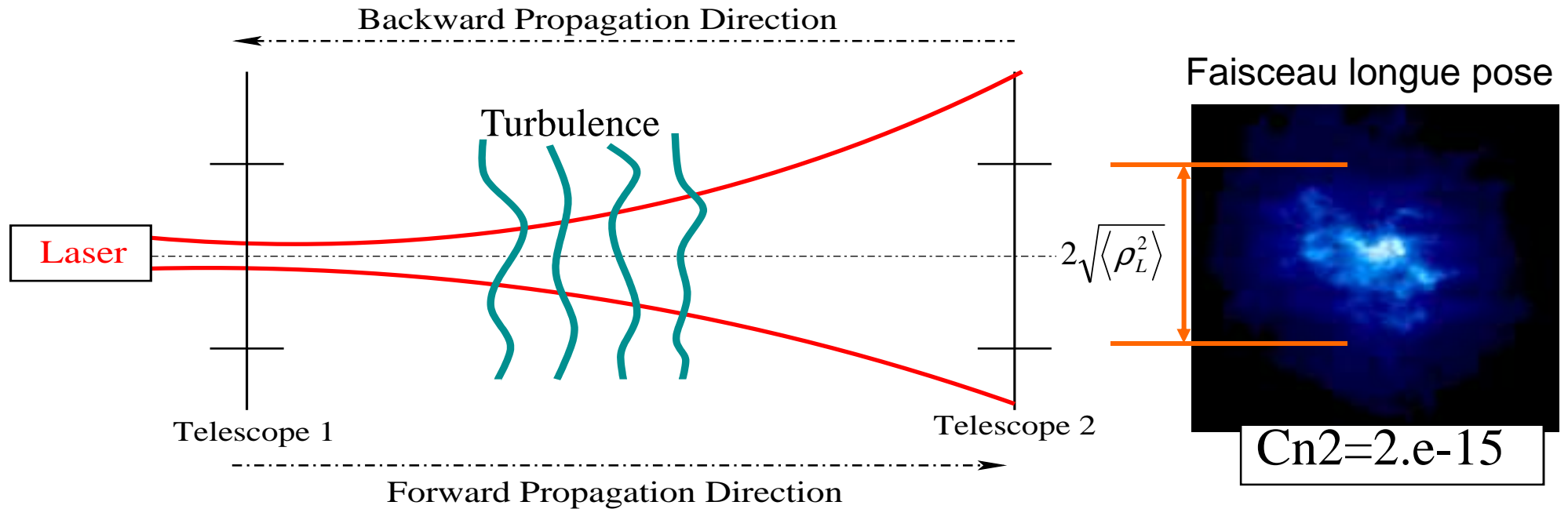
Fluctuations d'intensité : $\frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}$

Phase Precompensation - Principe



- ✓ Évolution temporelle de la turbulence (~ms)
- ✓ Comment estimer les perturbations?
 - Utilisation d'une sonde se propageant en sens inverse.
 - Optimisation de critère « Model-free optimization » (dithering)

Propagation laser – Effet de la turbulence (2)



Faisceau laser longue-pose en présence de turbulence atmosphérique

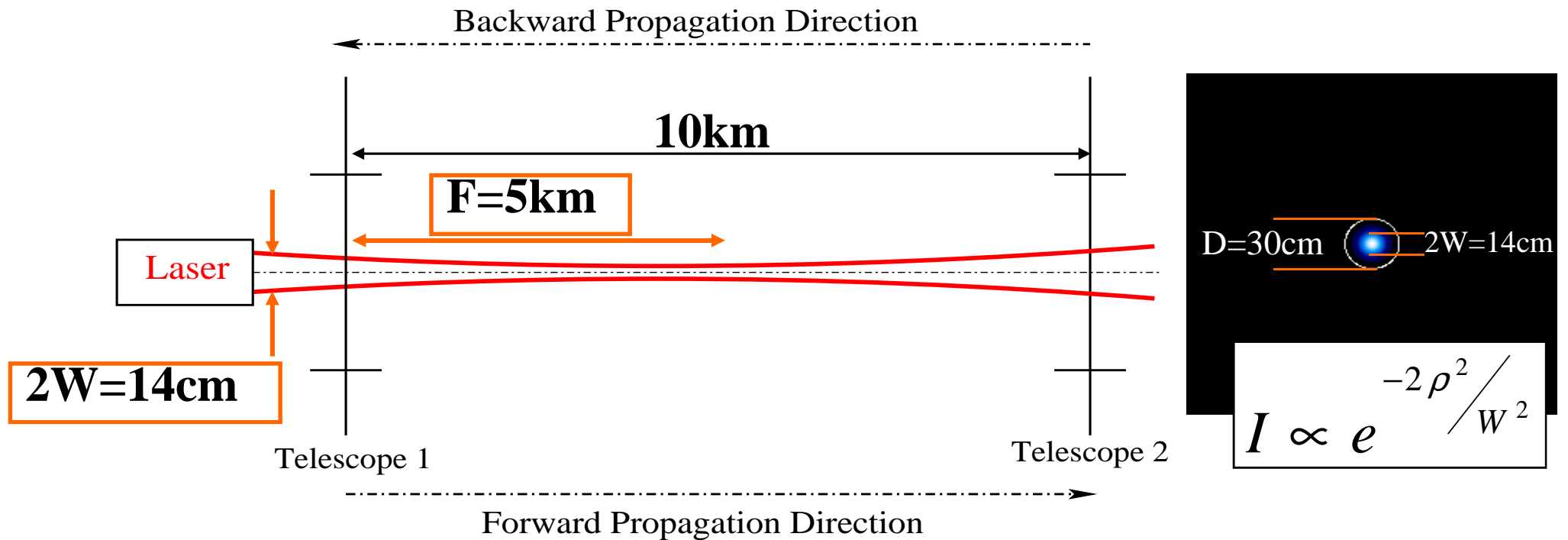
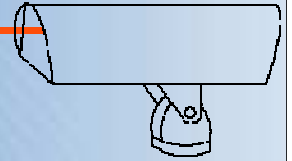
Divergence Turbulence

$$\langle \rho_L^2 \rangle = \frac{2x^2}{k^2 W^2} + \frac{W^2}{2} \left(1 - \frac{x}{F}\right)^2 \frac{4x^2}{k^2 \rho_0^2}$$

$$\rho_0 = \left[0.5475 * k^2 * x * C_N^2\right]^{-3/5}$$

$Cn2$ [$m^{-2/3}$]	ρ_0 [m]	$2\sqrt{\langle \rho_L^2 \rangle}$
$2 \cdot 10^{-16}$	0.257	0.15
$2 \cdot 10^{-15}$	0.064	0.26
$2 \cdot 10^{-14}$	0.016	0.90

Propagation laser – Sans turbulence



Spécifications du système

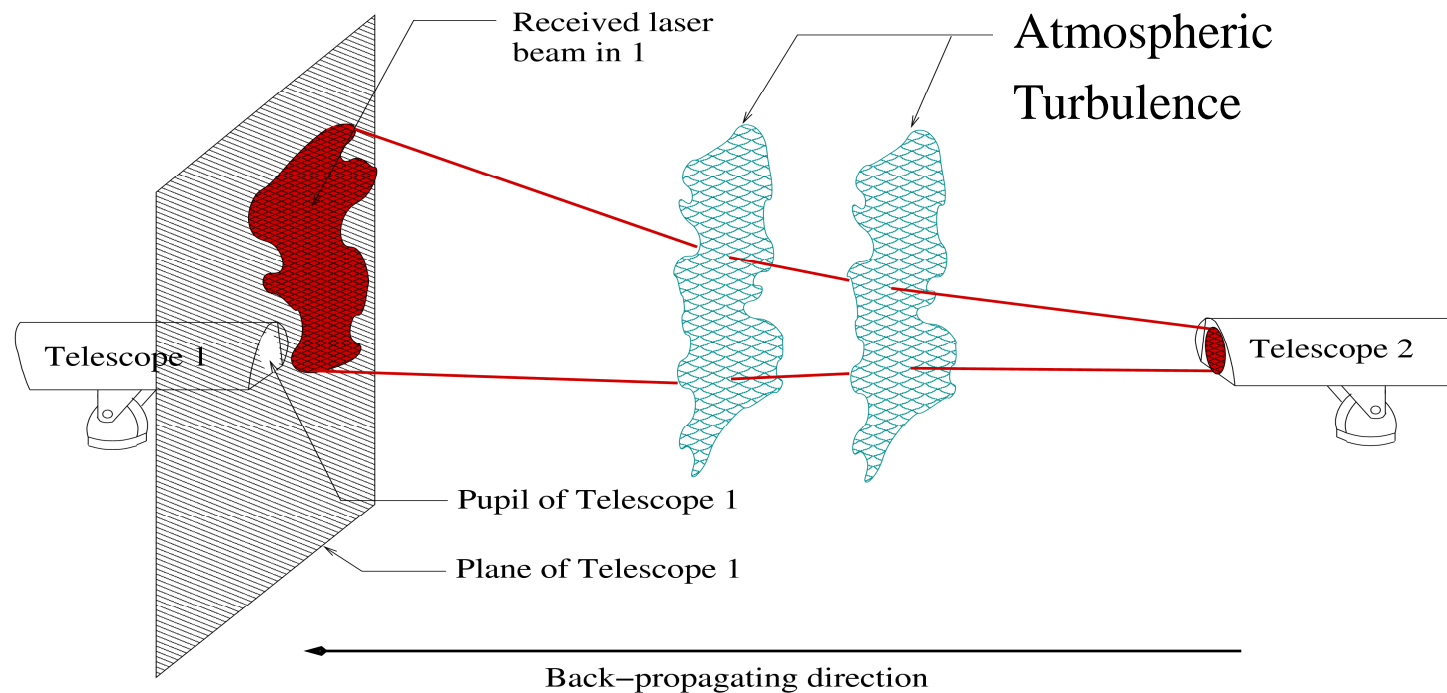
Diamètre pupille : D=30cm
Longueur d'onde : $\lambda=1.5\mu\text{m}$
Distance: L=10km

Caractéristique du faisceau

Diamètre optimum : 2W = 14cm
Distance de focalisation optimal :
F = 5km

Pupil Truncation & Opposite Beam Correction

Back-propagating Probe



Turbulence can lead the back-propagating probe to fall outside of the telescope, inhibiting the wave-front measurement:

- The back-propagating probe must also be pre-compensated.
- The optimum corrections are computed iteratively.