



Optique Adaptative pour les Applications de Défense Activités Onera

J.-M. Conan

V. Michau, B. Fleury, C. Robert, M.-T. Velluet

T. Fusco, C. Petit, J.-F. Sauvage

Thèses : A. Costille, N. Vedrenne

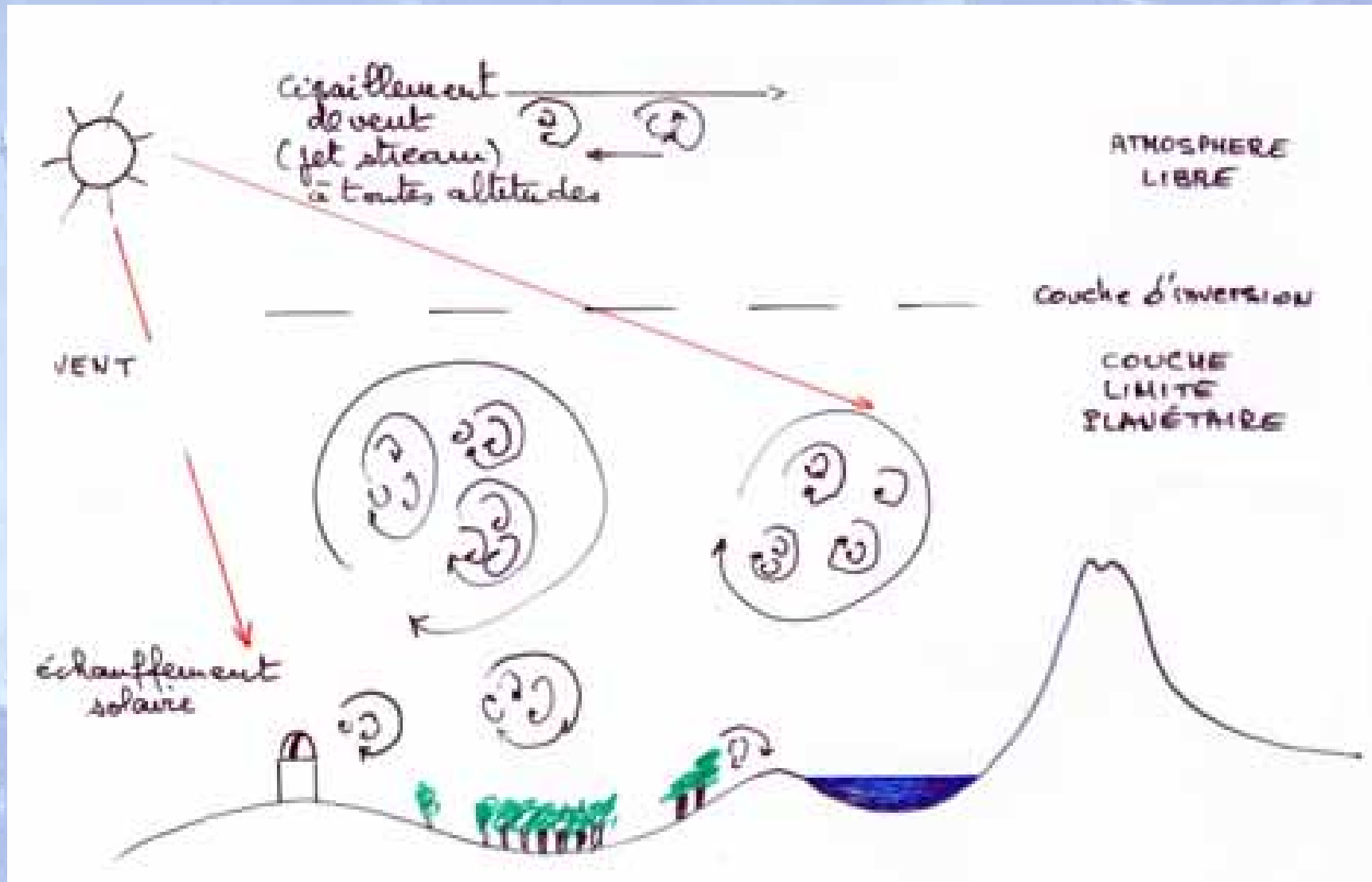


retour sur innovation

Plan de l'exposé

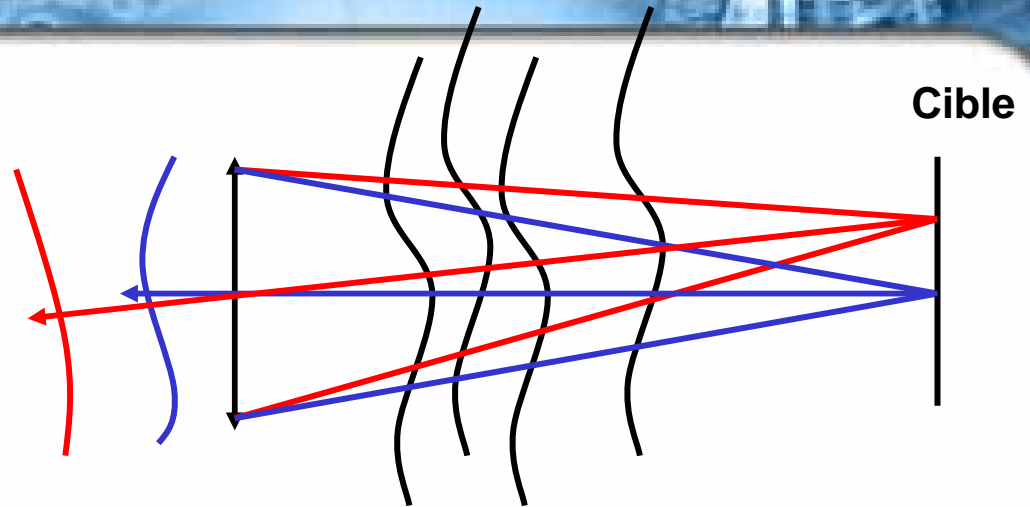
- **Propagation optique et turbulence atmosphérique:**
turbulence, scintillation, anisoplanétisme, optique adaptative
- **Propagation/Focalisation de faisceaux laser**
- **Imagerie à haute résolution angulaire corrigée par OA :**
 - **Surveillance de l'espace**
 - **Imagerie passive sol-air**

Formation de la turbulence



Turbulence atmosphérique : Anisoplanétisme de phase et de scintillation

- Turbulence hors pupille :
 - **scintillation**
amplitude de l'onde affectée
 - **anisoplanétisme**
décorrélation angulaire de l'onde [phase et amplitude]



Spécificité des applications tactiques endo-atmosphériques:

- ligne de visée proche du sol :
 - *forte turbulence*
 - *turbulence significative sur l'ensemble du trajet optique*
- impact sur propagation :
 - *turbulence limite les performances même pour petits instruments*
 - *forte scintillation (saturation)*
 - *forts effets d'anisoplanétisme*

ONERA

Scintillation pour différentes turbulences (simulation PILOT)

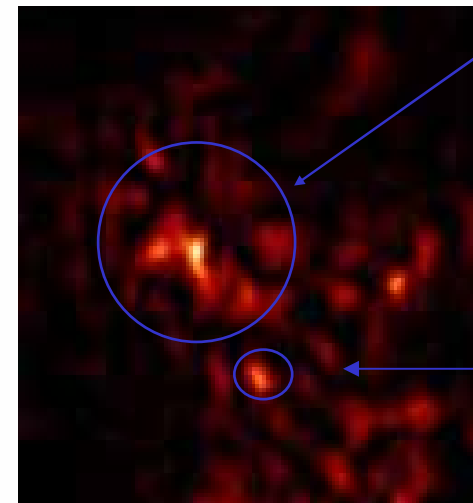
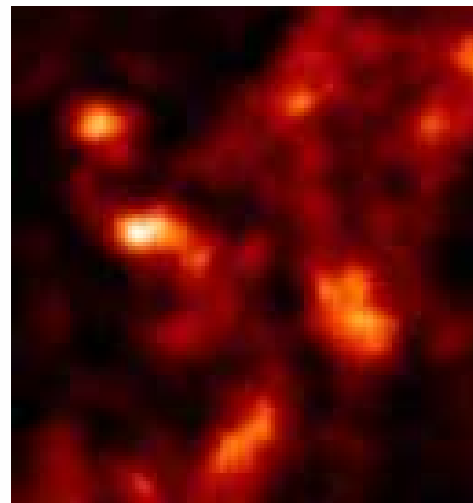
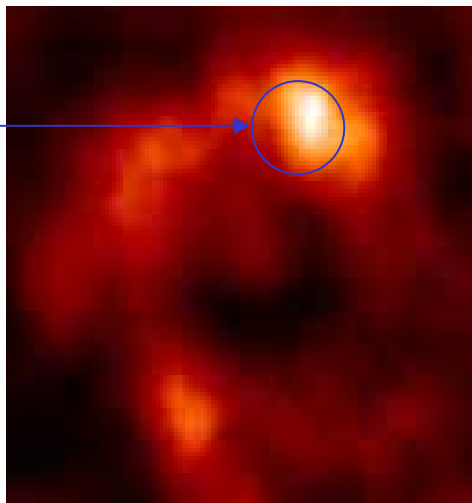
Scintillation Onde Plane sur L=4km en proche IR, écran de 30cm x 30cm

Turbulence : faible

forte

très forte

$$\sqrt{\lambda L}$$



$$\frac{\lambda L}{r_o}$$

$$r_o$$

modèles analytiques disponibles

pas de modèles simples

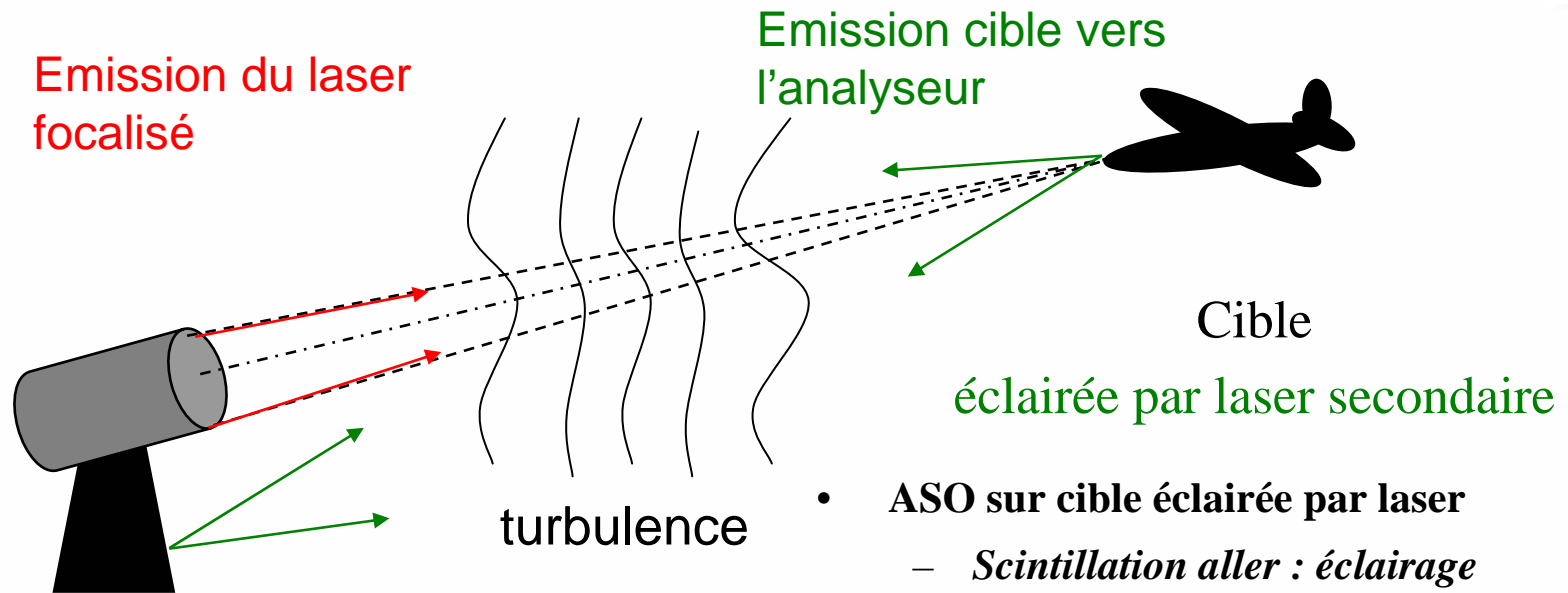
•Outils développés à l'Onera :

codes pseudo-analytiques

code de propagation PILOT (Propagation et Imagerie, Laser et Optique, à travers la Turbulence)

ONERA

Principe de la propagation laser corrigée par optique adaptative (PEA COMETE, SAGEM/SPART)



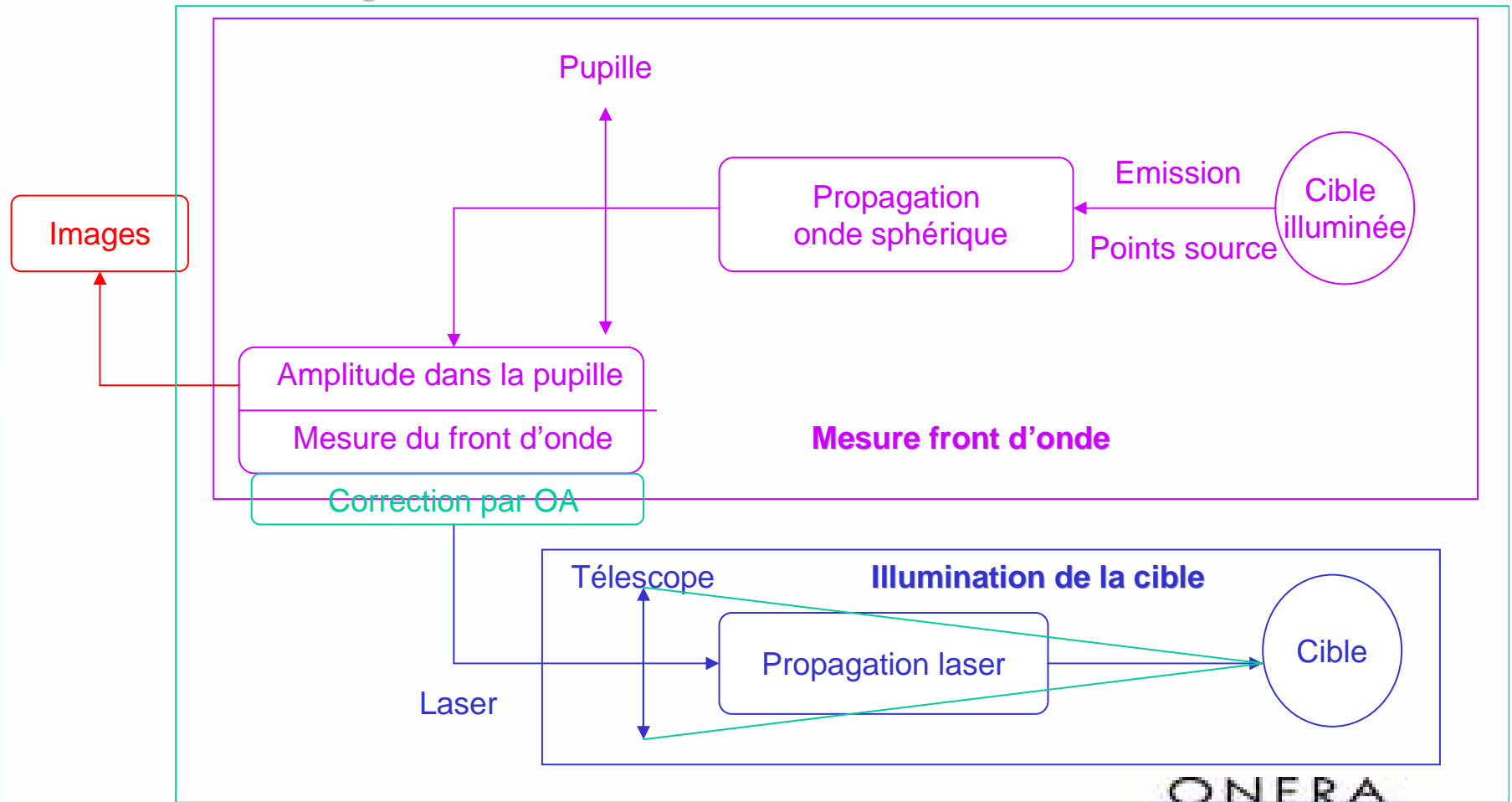
- Télescope d'émission
- Mesure du front d'onde sur la lumière « émise » par la cible
- Pré-correction de la turbulence par optique adaptative

- ASO sur cible éclairée par laser
 - Scintillation aller : éclairage
 - Effet speckle retour
 - Anisoplanétisme
- Pré-correction du laser focalisé :
 - simulation du système d'OA
 - performance en fonction du profil de turbulence

ONERA

Modélisation fine disponible (PILOT)

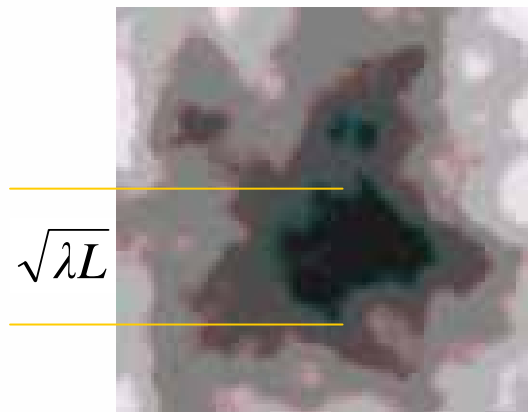
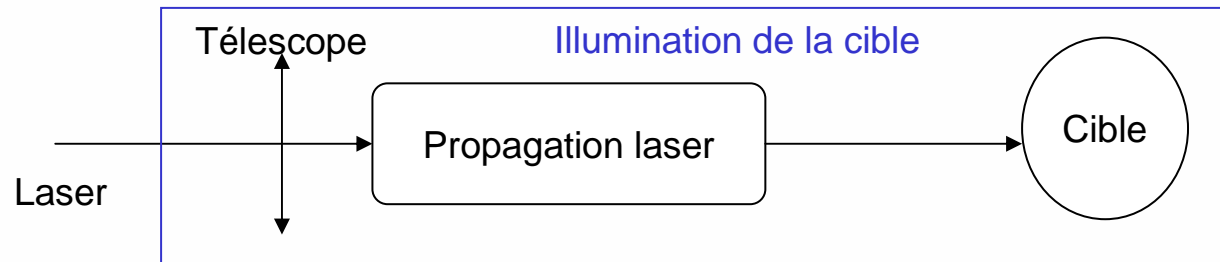
Formation d'images



Propagatation du laser de focalisation pré-corrigé

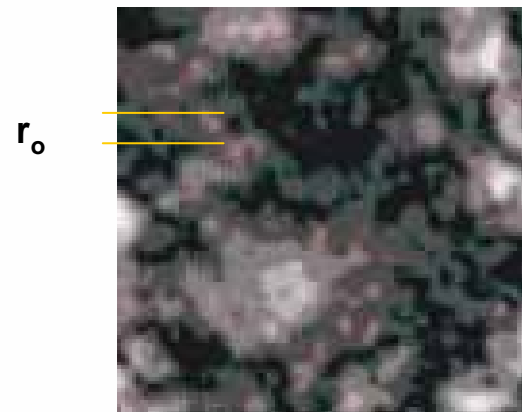
ONERA

Illumination de la cible



30 cm

$R_0 = 20$ cm

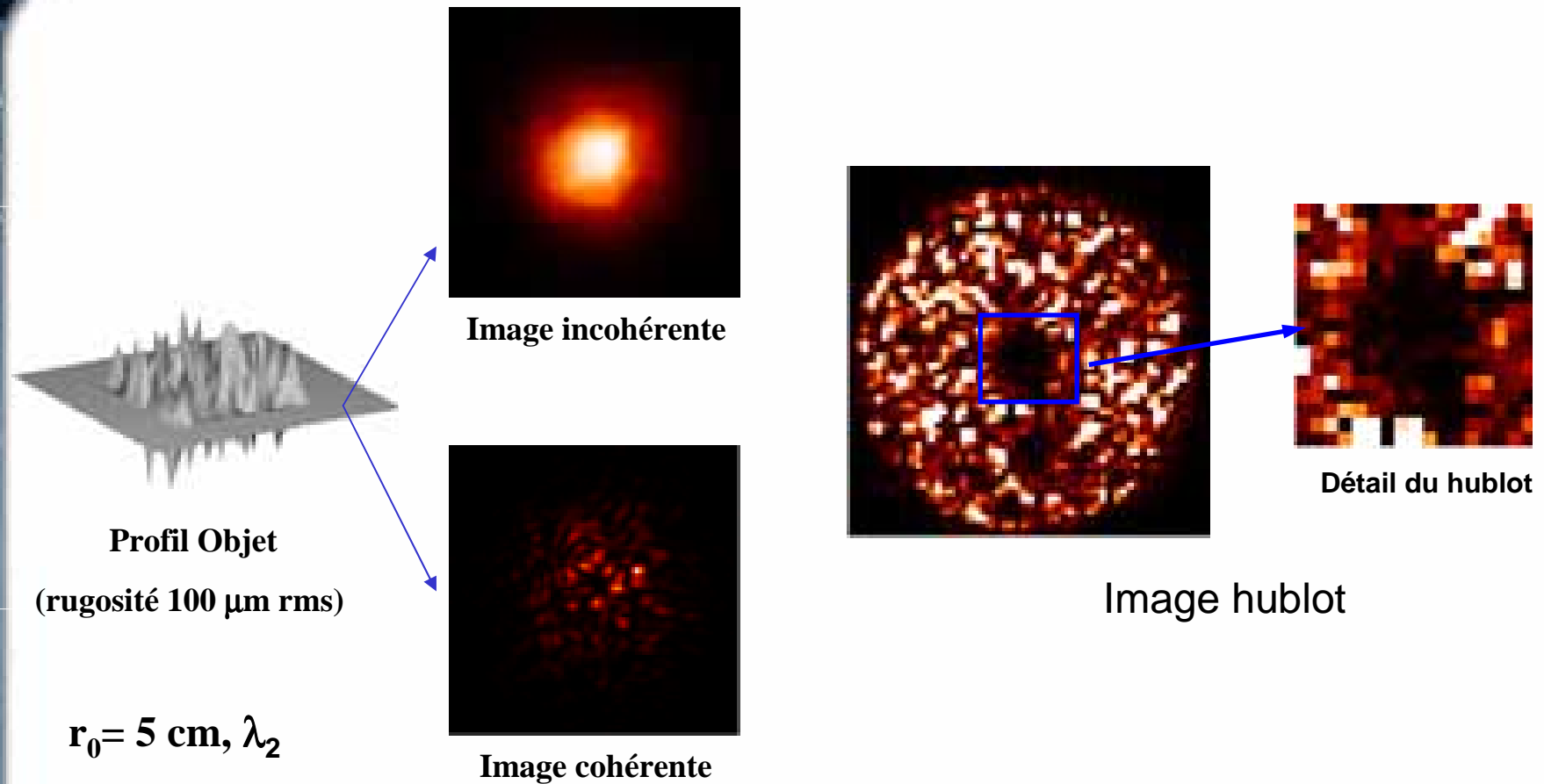


30 cm

$R_0 = 3$ cm

ONERA

Modélisation de la scène étendue vue par l'ASO

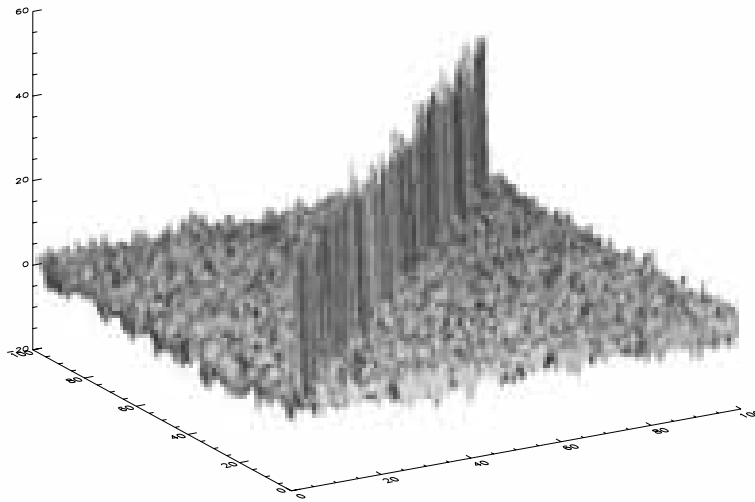


Erreurs ASO à étudier: speckle lié à la rugosité objet
+ effet d'anisoplanétisme

ONERA

ASO : différents termes d'erreur

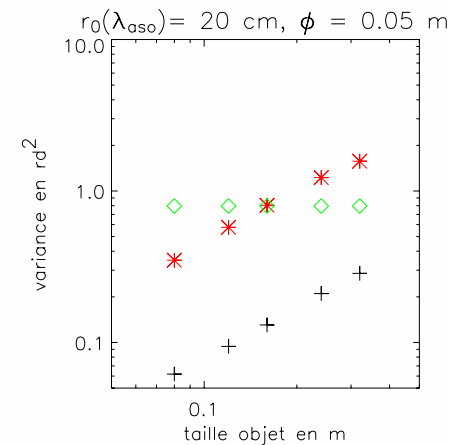
Erreurs ASO dans une sous-pupille:
erreurs **speckle** et anisoplanétisme
et **signal turbulent**



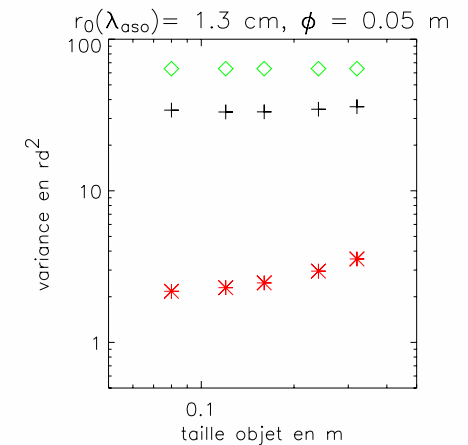
Décorrrelation entre sous-pupille
de l'erreur due au speckle



Bruit blanc sur ASO



Faible turbulence :
Speckle dominant

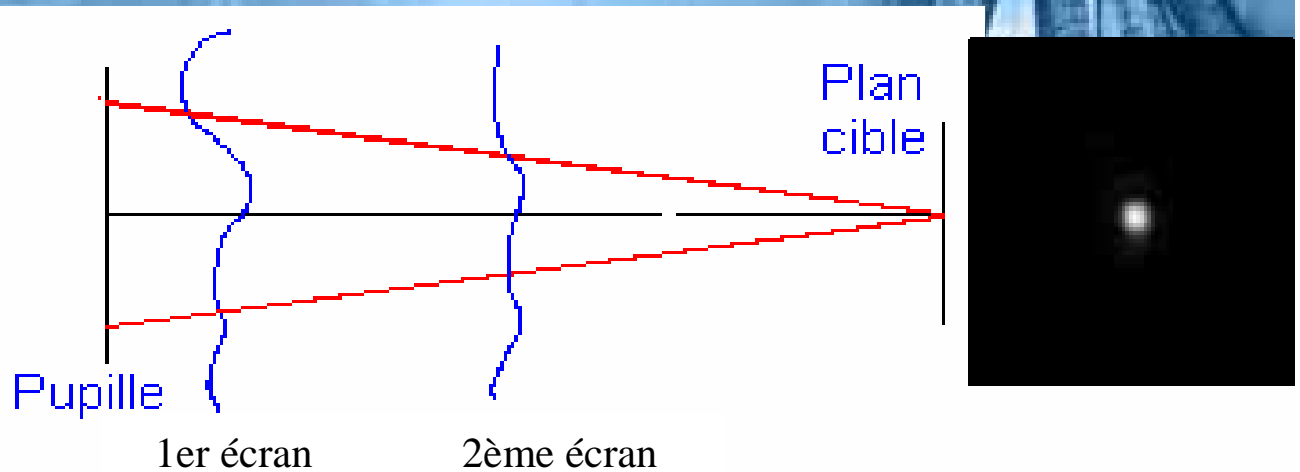


Forte turbulence :
Aniso dominant

ONERA

Pré-correction du laser par OA avant propagation

Simulation PILOT
2 écrans, $r_o = 6$ cm
analyse sur axe
sans erreur de mesure



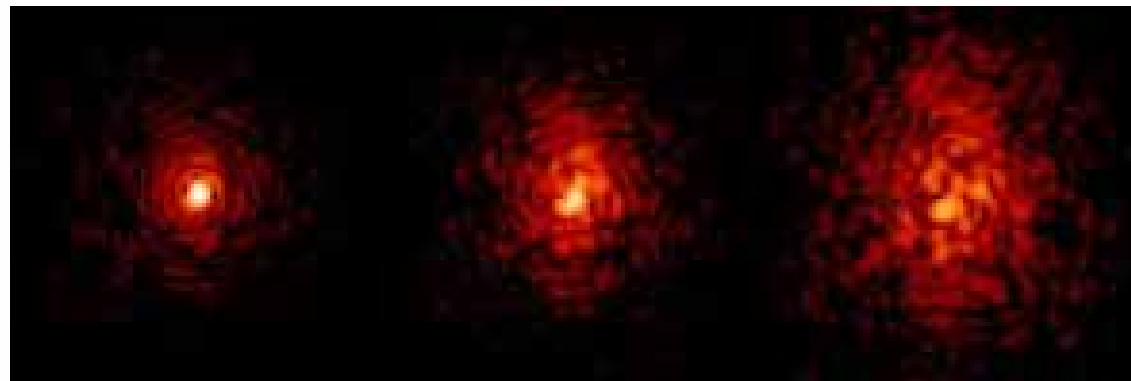
Répartition turbulence :

90%, 10%

50%, 50%

10%, 90%

Intensités
instantanées
en échelle log.



Qualité de correction :

SR = 85 %

SR = 33 %

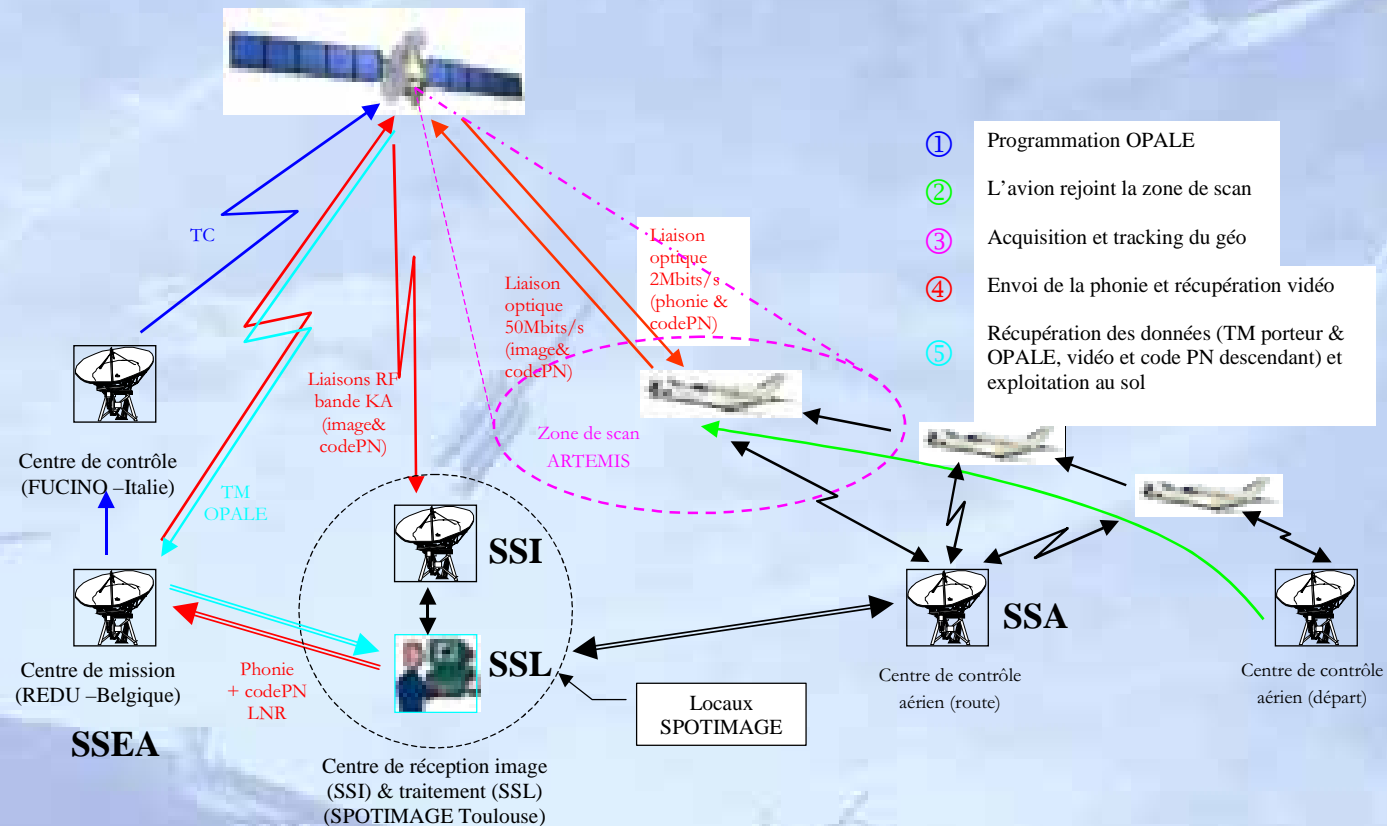
SR = 6 %

=> Importance du profil de turbulence sur la qualité de correction
=> intérêt d'une correction en volume (type OAMC)

ONERA

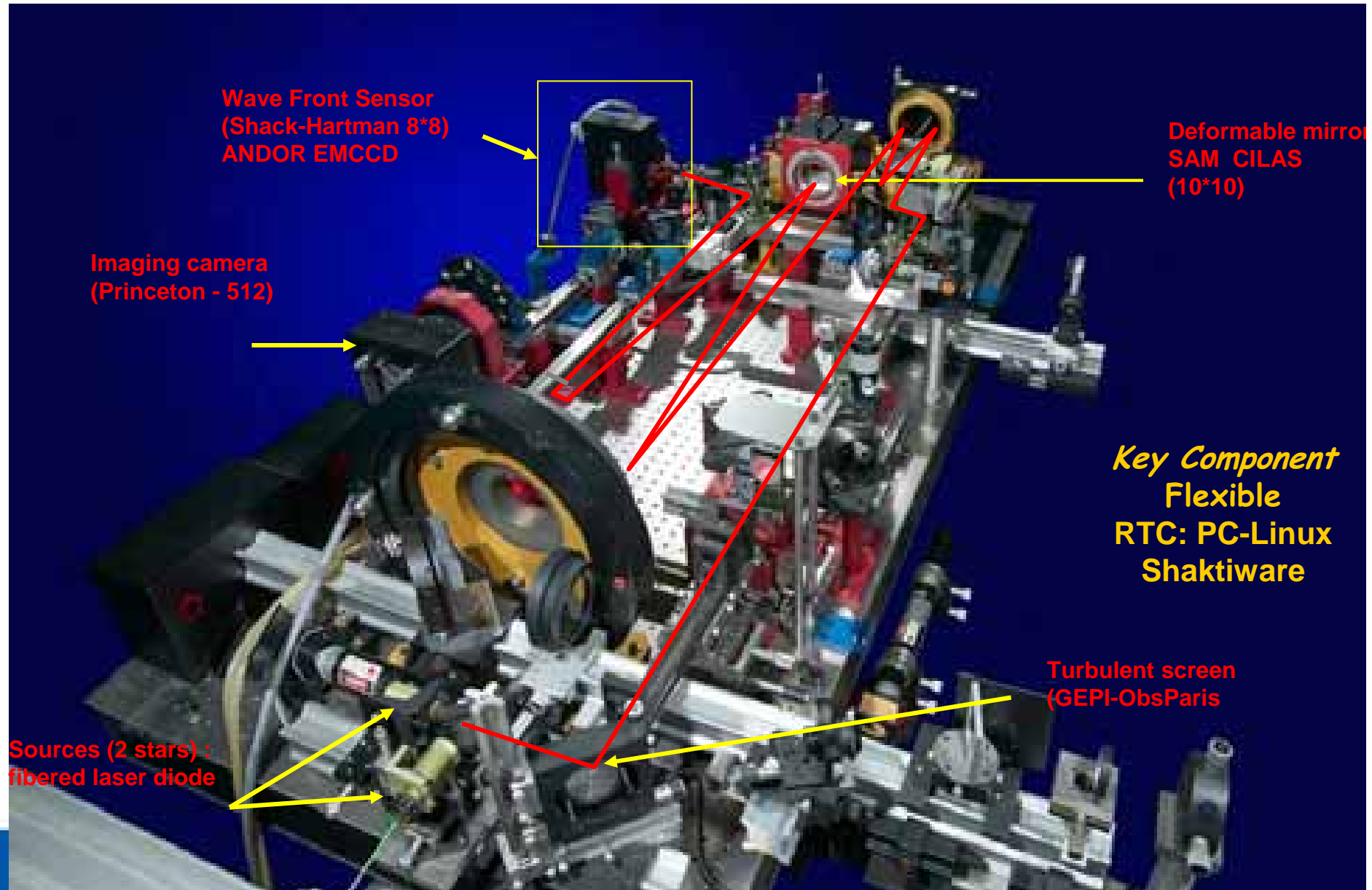
Télécommunications laser

- Lola : démonstrateur de télécommunication laser (DGA-Astrium)
avion/drone – satellite géostationnaire



- Télécommunication optique très haut débit au sol
Thèse Noah Schwartz collaboration ShaktiWare
voir poster

AO Bench at ONERA : BOA



Observation des satellites en orbite basse

Validation en laboratoire



Satellite

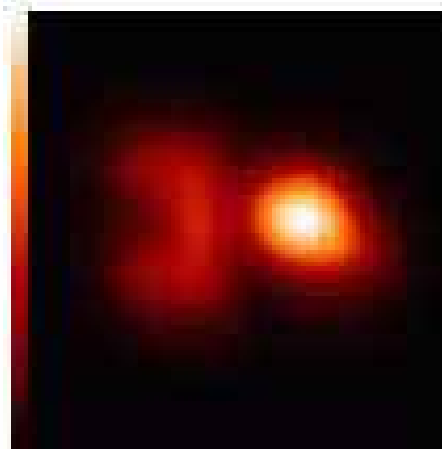


Image non corrigée



Image corrigée
et déconvoluée
par MISTRAL

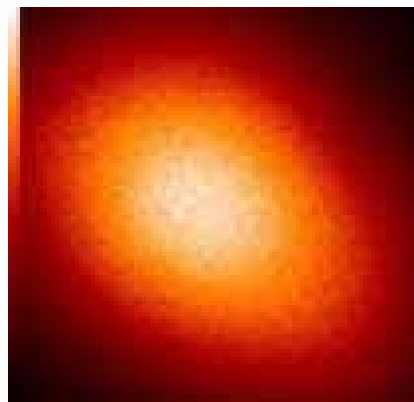
Banc BOA dimensionné pour la surveillance de l'espace

- optimisation dans le **visible** : résolution ~10cm à 300 km sur tél. qqes mètres
- **très haute cadence** : plusieurs kHz
- **post-traitement innovant** :

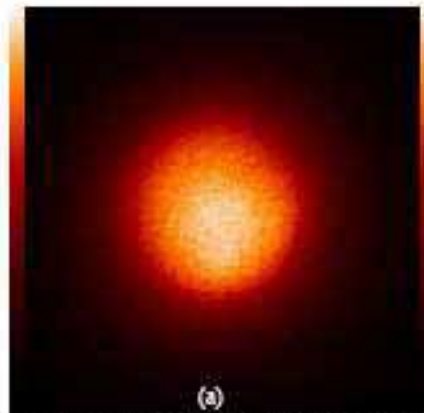
MISTRAL = Myopic Iterative Step-preserving Restoration ALgorithm

ONERA

On-sky BOA demonstration @ OHP 1.5m telescope



No correction



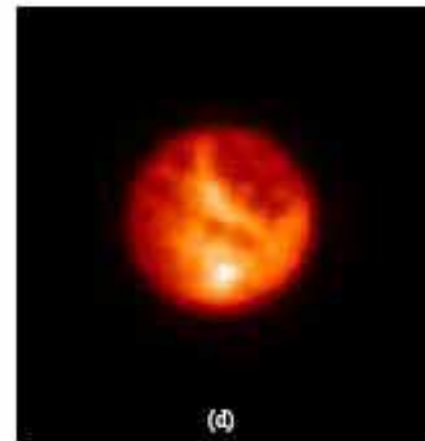
AO-corrected image [1997/09/28; 20:18 UT]



MISTRAL



synthetic image JPL/NASA/Caltech



synthetic image + 1.52 telescope PSF

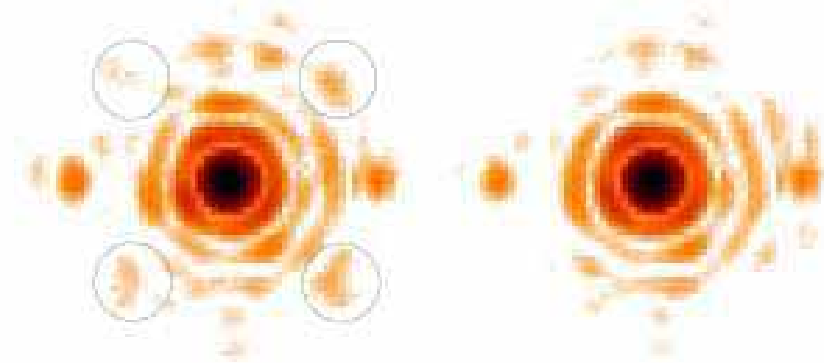
Ganymede: satellite of Jupiter.

$\lambda = 0,85 \mu\text{m}$
 $r_o \sim 7\text{cm}$
3,8'' FoV

MISTRAL = Myopic Iterative SStep-preserving Restoration ALgorithm

High performance AO with BOA

Optimal Control + High Precision Calibration Phase Diversity



Integrator

SR 89.5%

LQG/Kalman

SR 91.5%

- **Very high performance in visible : high SR, clean PSF**
- **Optimal handling of**
 - **Non common-path aberrations (phase diversity)**
 - **waffle, aliasing, temporal effects**

Pour les aspects commande : collab. Onera – L2TI-Paris13

voir Kulcsar et al. demain

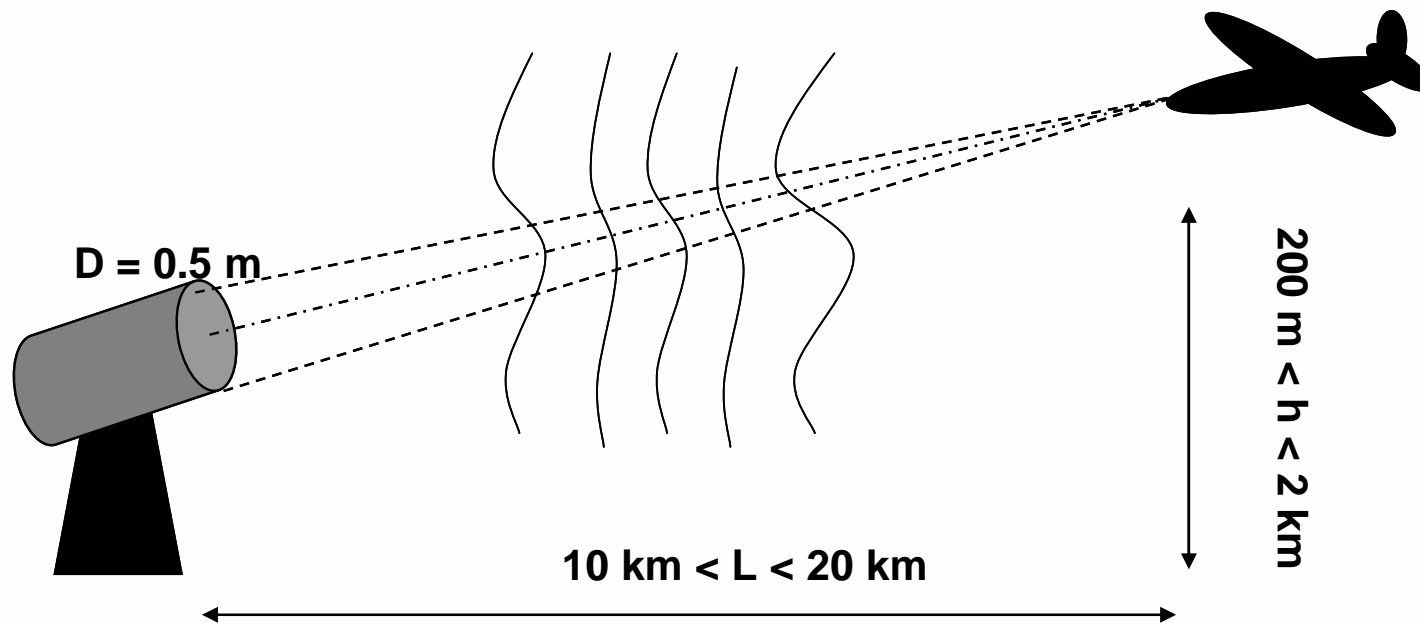
L2TI

ONERA

Observation de cibles aériennes (PEA INCA, STTC)

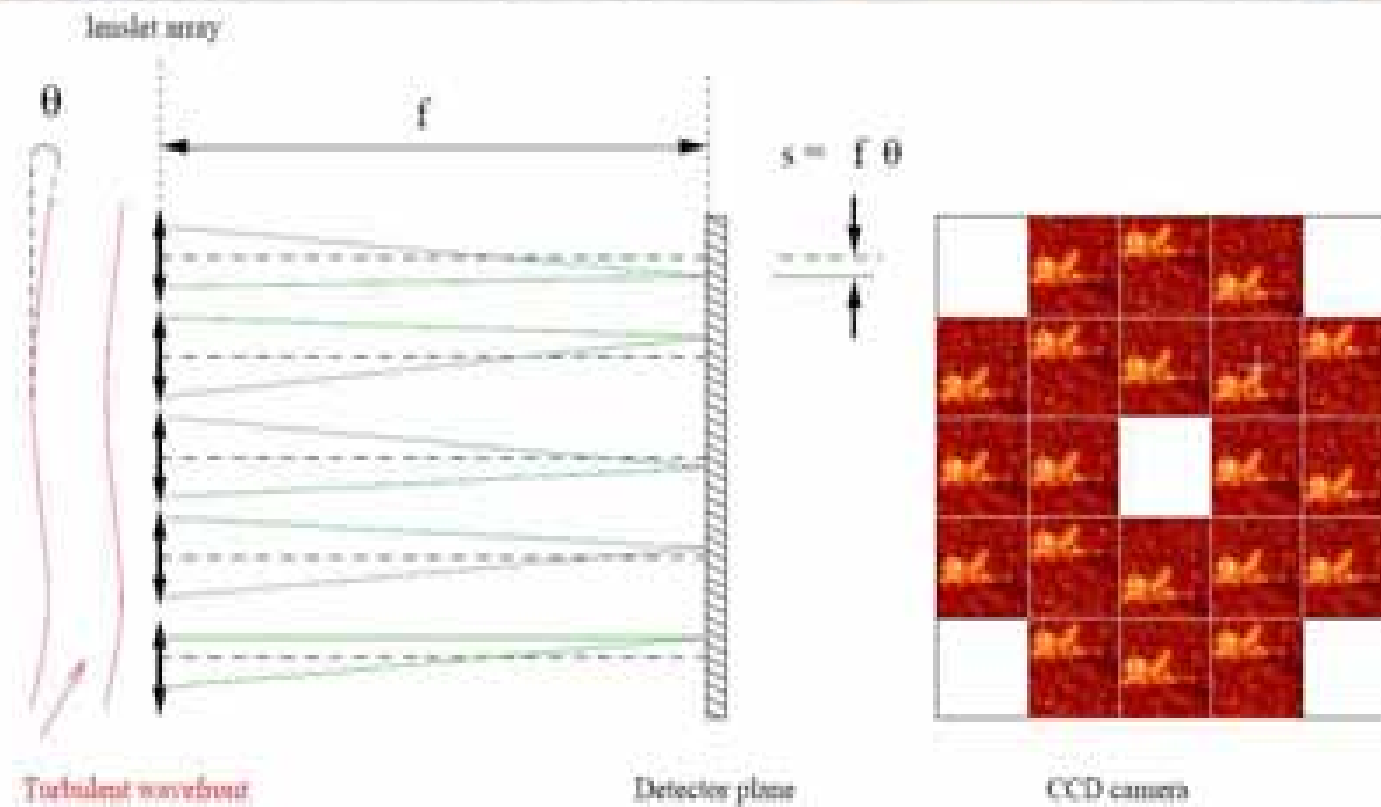
(Identification Nuit/jour de Cibles Aériennes)

- Imagerie IR en bande II ($\sim 4\mu\text{m}$), résolution visée $\sim 10\mu\text{rad}$ (10cm à 10km)



ONERA

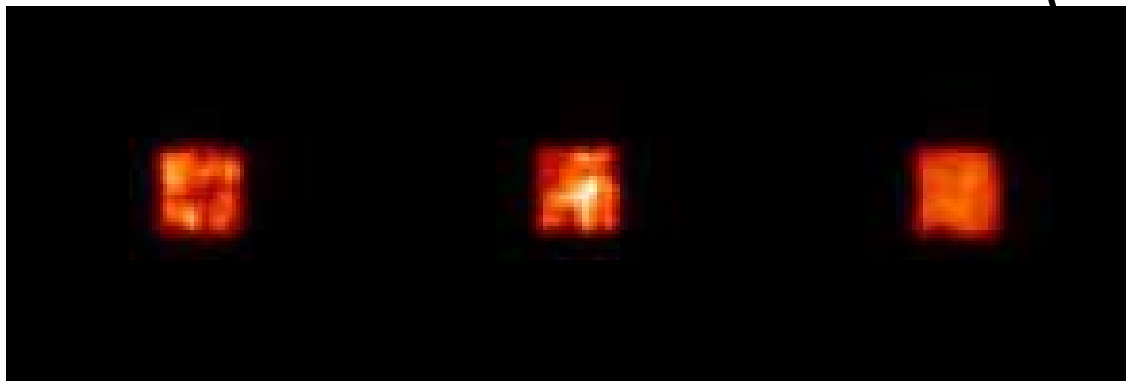
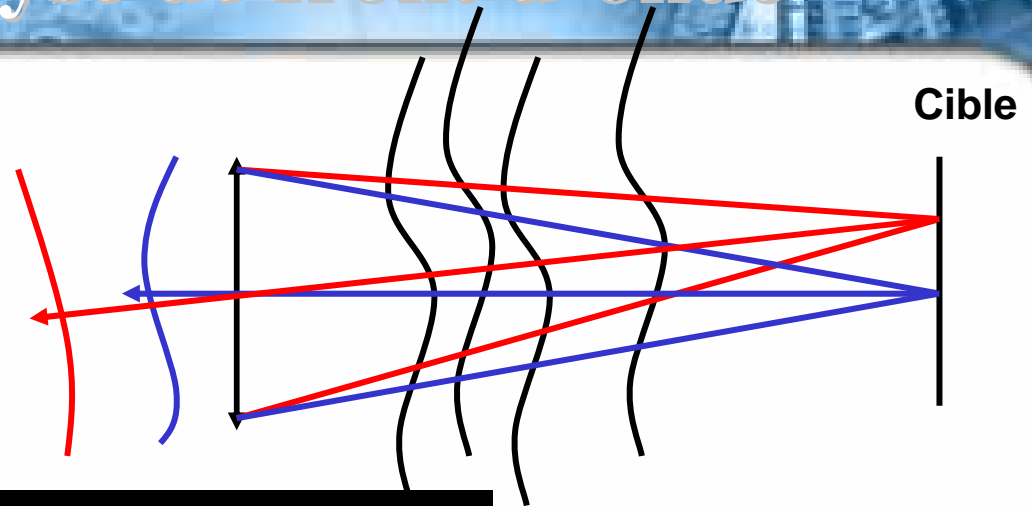
Analyse de front d'onde IR (bande II) de type Shack Hartmann



- ASO sur objet étendu faiblement contrasté
- en présence de scintillation et fort anisoplanétisme
- IR à $4 \mu\text{m}$: flux parasite, cryogénie
design et spécification des composants (détecteur, micro-lentilles...)

Anisoplanétisme de phase et de scintillation effet sur l'analyse de front d'onde

Formation d'image dans une
sous-pupille en présence
d'anisoplanétisme:
carré uniforme
(simulation PILOT)



$h = 2000 \text{ m}$
 $L = 20 \text{ km}$
 $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$
 $d = 0.1 \text{ m}$
 $\lambda = 4 \text{ }\mu\text{m}$

Phase seule

$$\sigma_{\text{aso}}^2 = 0.1 \text{ rd}^2$$

Amplitude seule

$$\sigma_{\text{aso}}^2 = 0.2 \text{ rd}^2$$

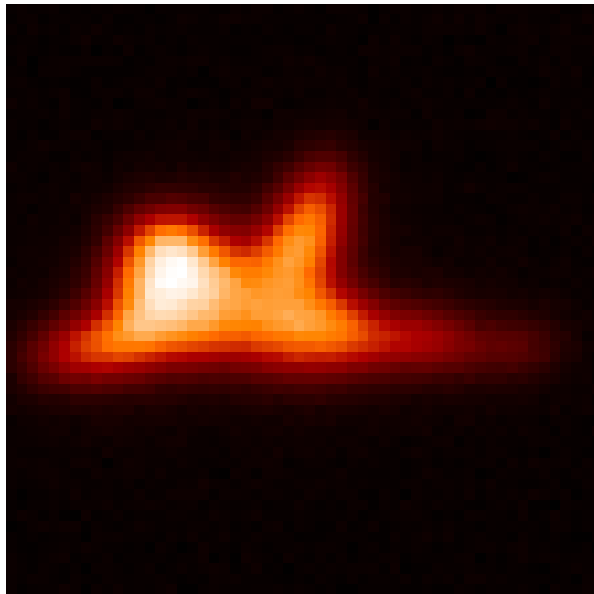
Phase et amplitude

$$\sigma_{\text{aso}}^2 = 0.5 \text{ rd}^2$$

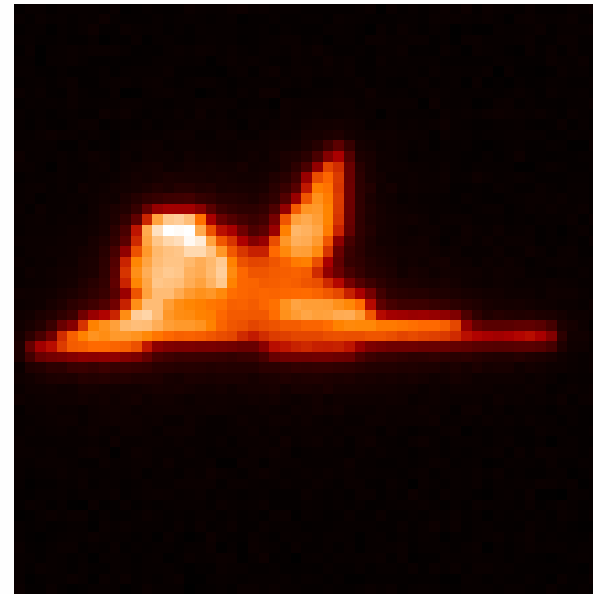
Estimation des erreurs ASO induites par anisoplanétisme
Robert et al. & Vedrenne et al. JOSA A

ONERA

Simulation des performances de l'optique adaptative



Sans correction



Après correction par OA

L = 20 km, h = 2000m, $\lambda = 4 \mu\text{m}$, télescope 0.5 m

Shack-Hartmann : 5x5 sous-pupilles

Miroir déformable : 36 actionneurs

Echantillonnage temporel : 500 Hz

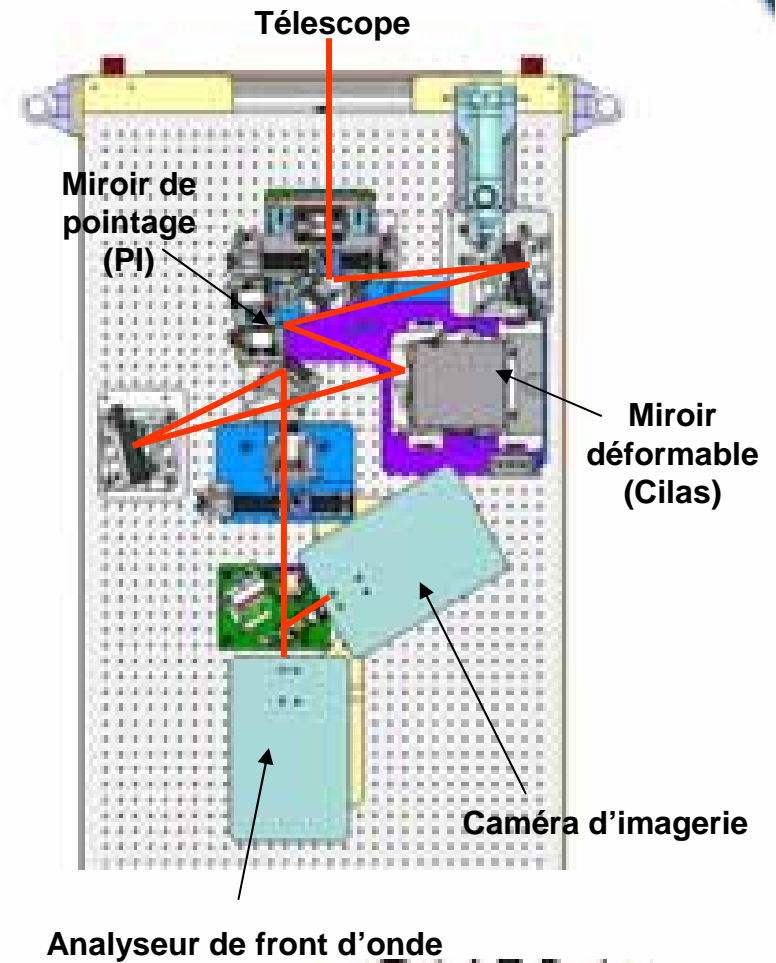
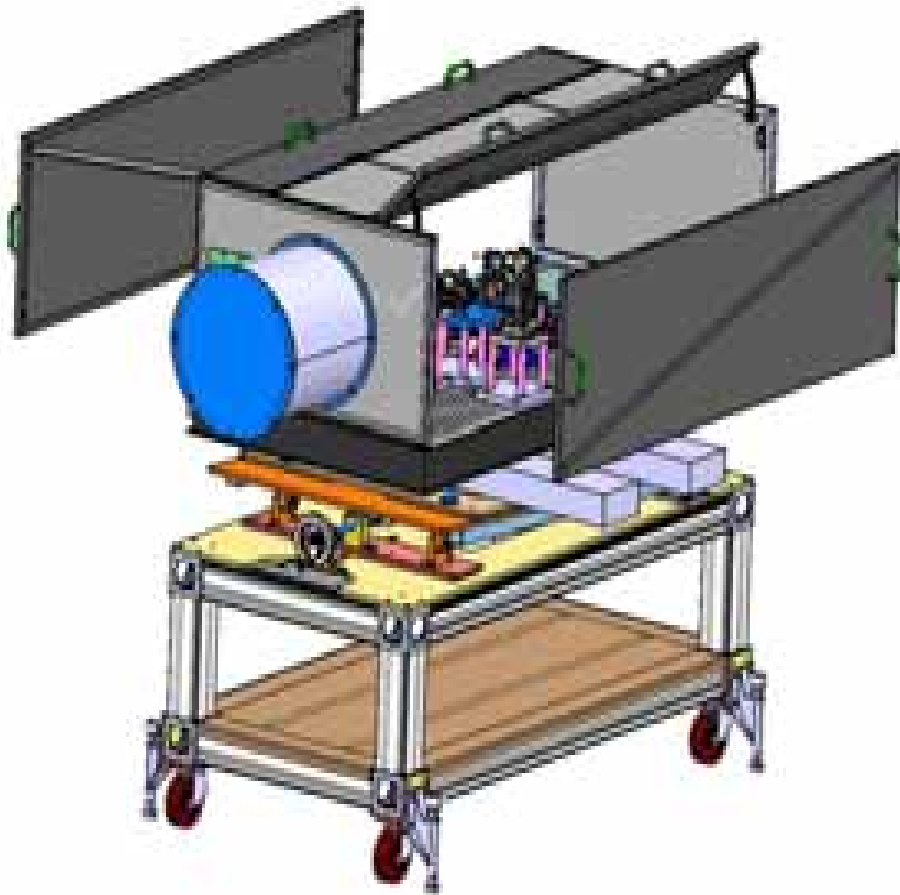
OA -> Gain significatif en résolution
donc en domaine d'emploi pour systèmes d'identification

ONERA

Configuration du démonstrateur INCA

- Télescope de 35 cm
- Miroir déformable
 - ◆ **SAM Cilas 10x10 actionneurs (portion utilisée 6x6)**
- **ASO IR grand champ (~ 4 μm)**
 - ◆ **14m à 10km (Shannon/2)**
 - ◆ **5x5 micro-lentilles Silicium + pupille froide + filtre froid Silios**
 - ◆ **Cryostat & Détecteur IR Sofradir : 125x125 pixels utiles à 440 Hz
25x25 pixels par sous-pupille**
- Calculateur temps réel
 - ◆ **RTC-Linux développé par Shaktiware**
 - ◆ **ASO par corrélation globale ou multi-zone WFS**
 - ◆ **Loi de commande : integrateur, commande Kalman/LQG**
- Caméra d'imagerie : Cryostat & Détecteur IR Sofradir
- *Extension OAMC envisagée*

Définition du démonstrateur INCA



ONERA

Intégration du banc INCA en laboratoire

Octobre 2007



Télescope



Caméra Imagerie



Miroir déf. CILAS



Caméra ASO

Essais en laboratoire : novembre 2007 – avril 2008

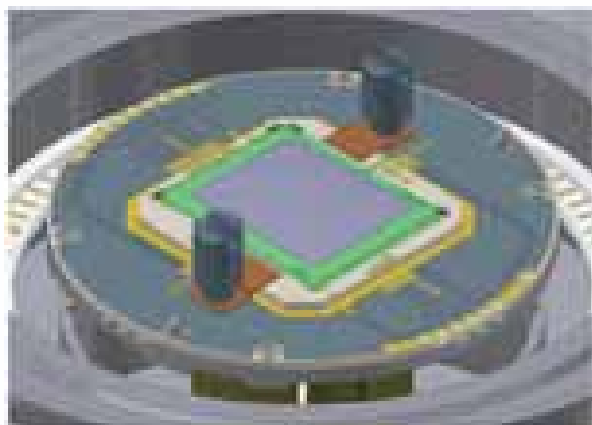
Essais terrains : juin et septembre 2008

SH-WFS IR et Stirling

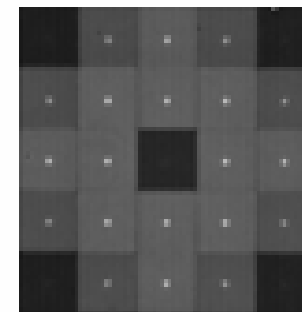


Spécifications sévères
Centrage $\mu\text{L}/\text{Détect.}$
 $\sim 5 \mu\text{m}$

Premières images ASO
Septembre 2007



Détecteur HgCdTe
CMOS Sofradir

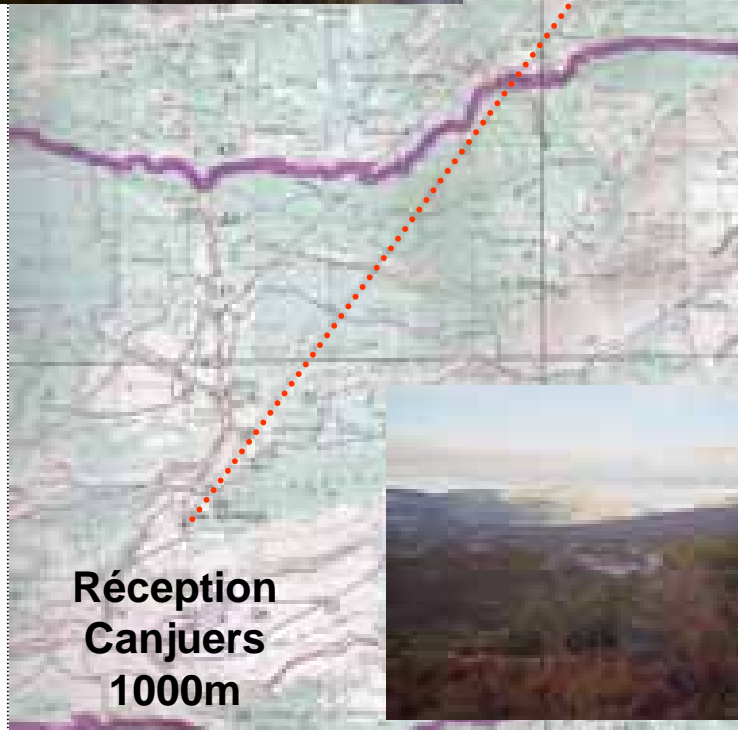


INCA -- Site pour Essais Terrain

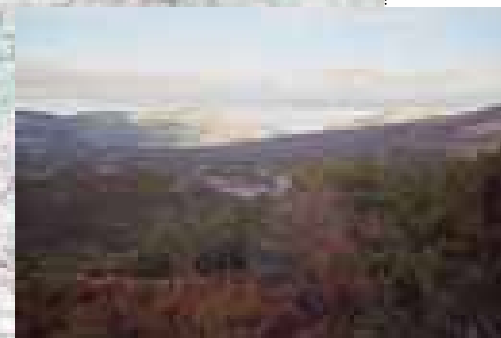
- Cible IR fixe coopérative
- Distance : 11,5 km
- Dénivelé : 715 m



Emission
Mont Lachens
1715m

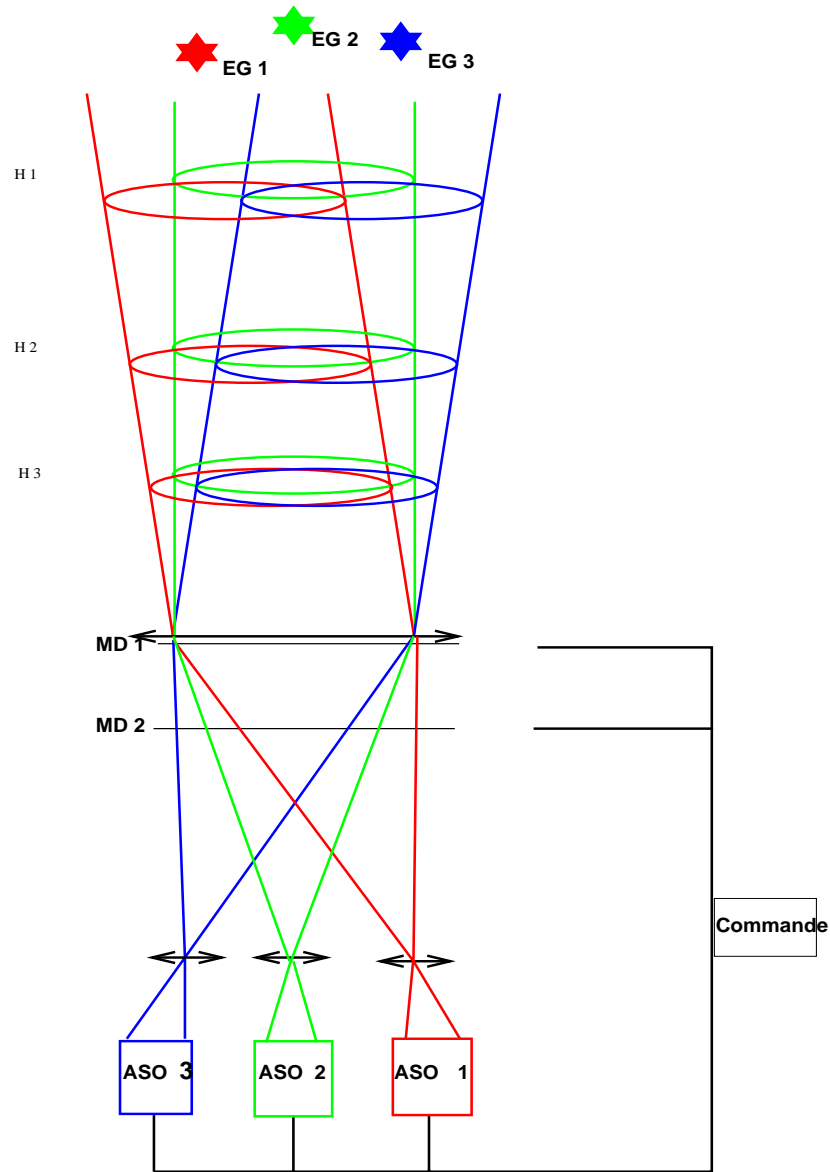


Réception
Canjuers
1000m



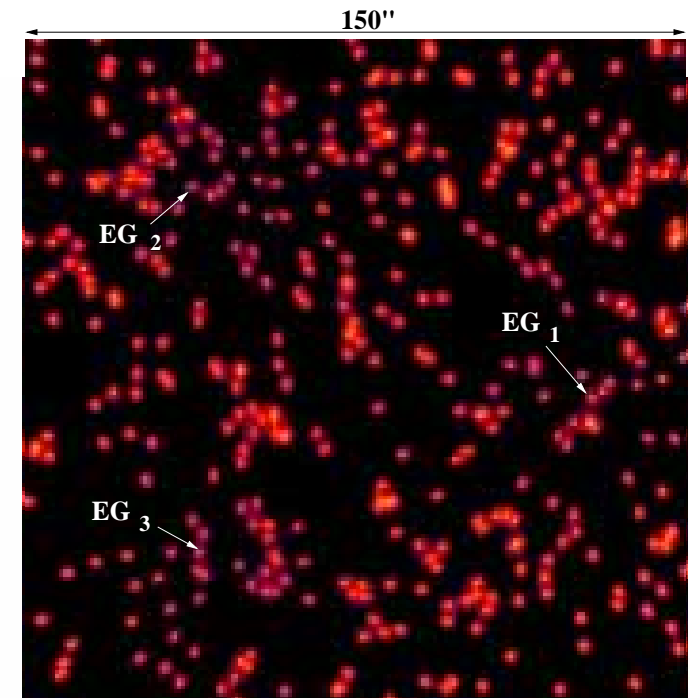
Principle of MultiConjugate AO

AO]



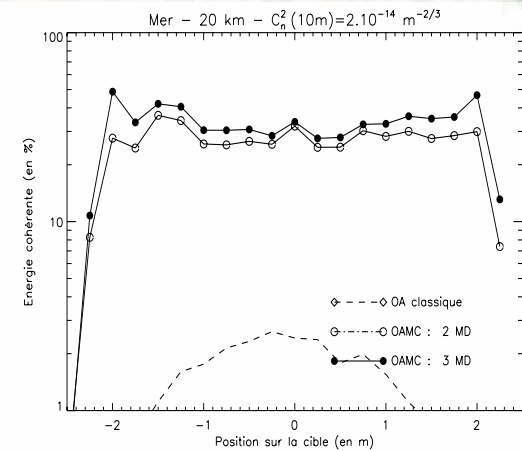
MCAO allows wide FoV correction;
Specificities:

- multi-guide-star wavefront sensing
- multi-DM correction of the turbulent volume

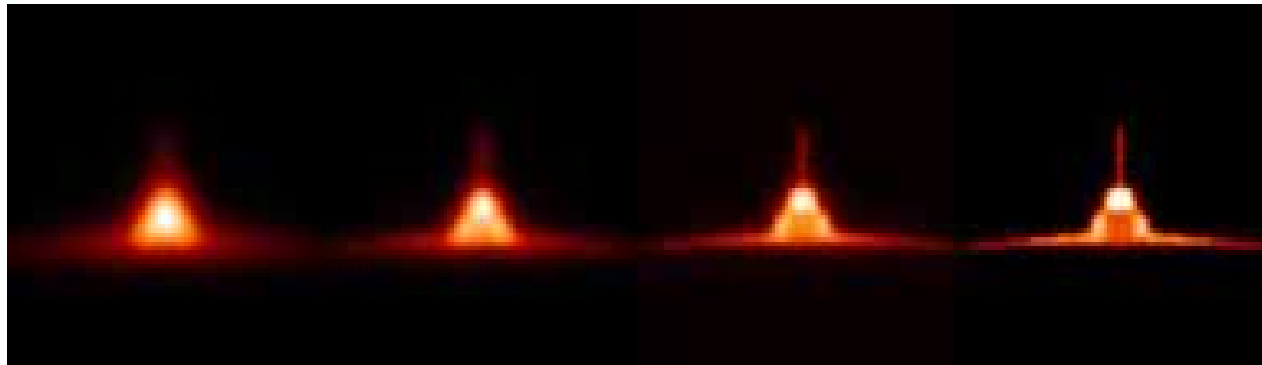


Apport de l'optique adaptative multiconjuguée (OAMC)

$\lambda = 4 \mu\text{m}$,
 $C_n^2 = 2.10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ à 10 m
 $L = 20 \text{ km}$, $h = 200\text{m}$
Analyseur 5x5, multi direction

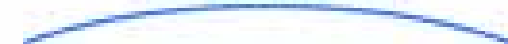


sans correction correction 1 MD correction 2 MD diffraction



OAMC -> gain important en qualité de correction
dans conditions sévères d'anisoplanétisme

ONERA



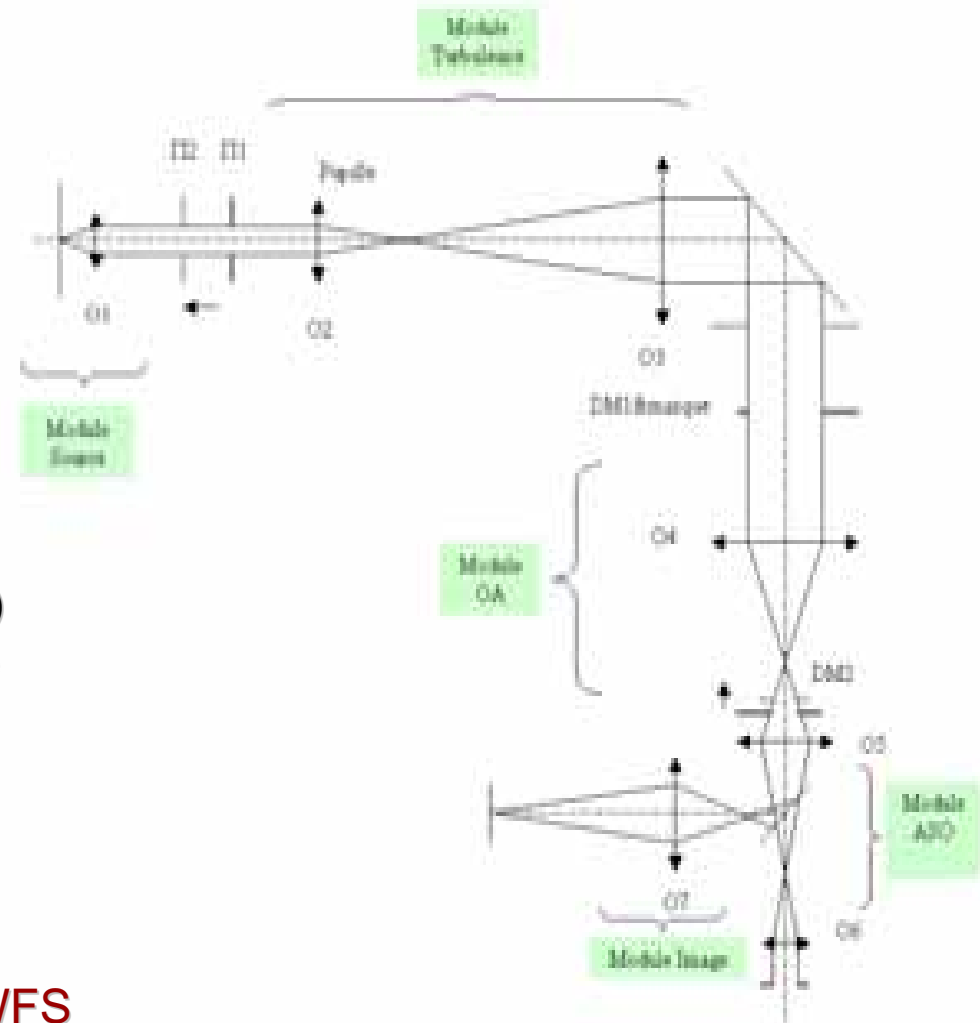
Etude DGA-REI 2006-2007

Objectifs HOMER :

- démonstration OAMC dans condition d'anisoplanétisme raisonnables
- calibration à haute précision
- commande innovante
- ASO sur source étendue (corrélation...)
- extension à des cas de turbulence forte

Forte synergie avec thématiques astros:

- MCAO, « L »TAO, GLAO...
- **ELT-like Multi-Stage AO:**
DM1+VeryWideField WFS
& DM2 followed by WideField WFS
- *MFoV configuration*



Homer : characteristics

- Deformable mirror
 - ◆ magnetic / act. in altitude
- Wide Field WF
 - ◆ **Wide Field**
 - ◆ **7x7 micro-**
 - ◆ **Very low n**
 - ◆ **142x142 pixels**
- RealTimeComp
 - ◆ **Flexible R**
 - ◆ **(coupling v**
 - ◆ **multi-zone**
- Imaging Camera
 - ◆ **ANDOR 1000x1000 at a few HZ**
- Optical scheme
 - ◆ **solution with adjustable altitude conjugation for MD2**

| | formule | valeur |
|--|--|---------------------------|
| longueur d'onde λ | | 633 nm |
| demi-champ | | $308 \frac{\lambda}{D}$ |
| pupille dans l'espace d'entrée D | | 4 mm |
| pupille sur DM1 | | 17.5 mm |
| pupille sur DM2 | | 22.5 mm |
| nombre de sous-pupilles ASO | | 7 |
| taille pixels caméra ASO (d_{pix}) | | 8 μ m |
| nombre de pixels caméra ASO (N_{pix}) | | 1004 \times 1002 pixels |
| nombre de pixels par sous-pupille ($N_{pix/asp}$) | | 142 |
| pupille devant l'ASO d_{ASO} | | 7.9 mm |
| diamètre micro-lentilles devant l'ASO ($d_{micro-lens}$) | $N_{pix/asp} \times d_{pix}$ | 1.136 mm |
| échantillonnage (caméra ASO et Imagerie) | | Shannon |
| focale des micro-lentilles ($f_{micro-lens}$) | $\frac{2 \times d_{pix} \times d_{micro-lens}}{\lambda}$ | 28.6 mm |
| nombre de pixels caméra Image | | 1024 \times 1024 pixels |
| taille pixels caméra Image | | 13 μ m |
| distance à la pupille (esp. entrée) pour dec = 40 % | $\frac{dec \times D}{\sin(\theta)}$ | 16.4 mm |
| distance à la pupille (esp. entrée) pour dec = 60 % | | 24.5 mm |

Tableau 6.1 - Tableau récapitulatif des principaux paramètres de dimensionnement du banc HOMER

MCAO laboratory test HOMER

[Hartmann Oriented Multico

October 2007



A

WFS and imaging at visible wavelengths



**RTC-Linux
ShaktiWare**



**Imaging camera
ANDOR CCD 1000x1000**

DM2

DM88 ALPAO

WFS

**Onera micro-lens
ANDOR EM CCD 1000x1000**



**System integrated – aligned
Loop closed in classical AO**



DM52 ALPAO

DM1



Source



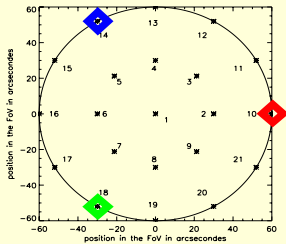
HOMER Expected Performance

MCAO Optimal Control

numerical simulation

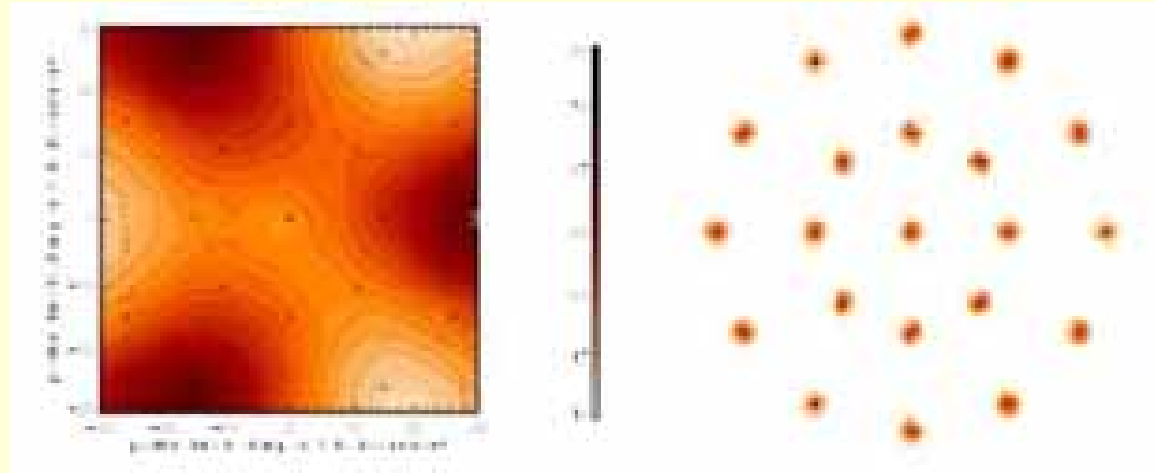


[2T]



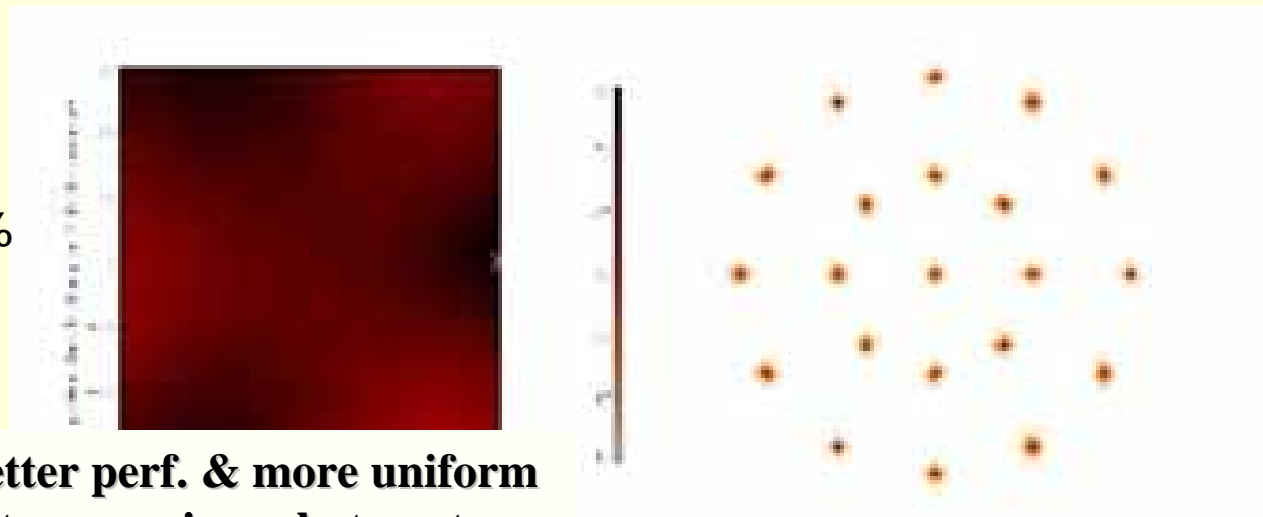
MCAO with integrator
based on generalized
Mint

SR = GSs 70% Center 58%
std dev. 8%



MCAO with LQG control

SR = GSs 78% Center 72%
std dev. 4%



Optimal control gives better perf. & more uniform
Strong advantage for post-processing, photometry...

VOIR Présentation Kulcsar L2TI DEMAIN

Conclusion

- **Large domaine d'application de l'OA pour défense :**
 - **Imagerie/identification :**
 - surveillance espace et imagerie endo-atmosphérique
 - **Focalisation de faisceaux laser**
 - **Télécommunications optiques à haut débit (civil et défense)**
- **3 Instruments désormais disponibles :**
 - OA visible: BOA ; OA IR INCA ; OAMC visible HOMER
 - 2008 : exploitation labo HOMER, essais terrain INCA
- **Domaine exigeant en terme de composants**
 - **MD bas ordre mais:**
 - rapides, grande course incluant correction tip-tilt pour compacité
 - **Détecteurs IR compacts, rapides, à faible bruit**
 - normes sur vibrations induites par cryogénie
 - **RTC rapide : coût de calcul important pour calcul de front d'onde**

Perspectives

- **Thèmes de recherche :**
 - **propagation en forte turbulence** (scintillation, anisoplanétisme)
impact sur ASO, OA et OAMC
 - **ASO** sur objet étendu faiblement contrasté :
algo mesure globale et multi-zone
 - **commande optimale** (forte turbul., voire non stationnaire...)
et architectures RTC associées [collab. L2TI & ShaktiWare]
 - **caractérisation et mesure de force/profil turbulence**
- **Démonstrations :**
 - Adaptation de HOMER à des cas de fort anisoplanétisme
 - Extension de INCA à l'OAMC
- **Forte synergie avec civil et notamment astro**