



L'Optique à Paris  
Ecole Normale Supérieure  
le 17 novembre 2011

## Optique Adaptative et Astronomie

**Gérard Rousset**  
Université Paris Diderot - Paris 7  
LESIA, Observatoire de Paris  
[gerard.rousset@obspm.fr](mailto:gerard.rousset@obspm.fr)

### Plan de l'exposé

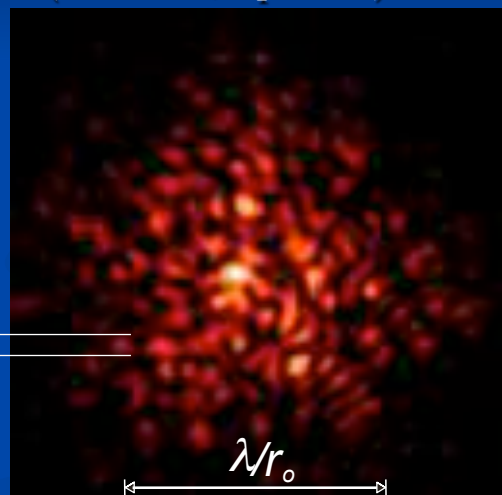
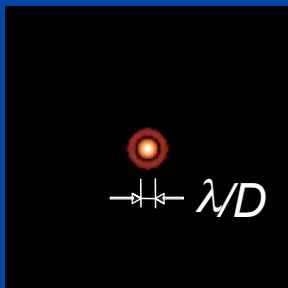
- Grands télescopes et turbulence atmosphérique
- L'optique adaptative
- Imagerie directe des exoplanètes
- Les solutions pour la limitation du champ et de la couverture du ciel
- Perspectives

# Nécessité des très grands télescopes

- Le pouvoir collecteur augmente avec le carré du diamètre
  - Donne accès à des objets célestes de luminosité très faible
- Le pouvoir de résolution théorique augmente avec le diamètre
  - Donne accès à des séparations très faibles :
    - ~ 0,05 sec. d'arc (~ 0,25  $\mu$ rad) en proche infrarouge pour un télescope de 8m
    - ⇒ correspond à une séparation de 1 UA à 65 années-lumière

## Dégradation des images par la turbulence atmosphérique

Image d'un point source (FEP) :  
limitée par la diffraction (tache Airy)      dégradée par la turbulence (tavelures / speckles)



Diffraction (10m) : 0,01" à 0,5  $\mu$ m  
Turbulence : 1" avec  $r_0(\lambda^{6/5}) = 10$  cm à 0,5  $\mu$ m

# Origine de la dégradation

Ondes planes

Airy



Ondes perturbées

image dégradée



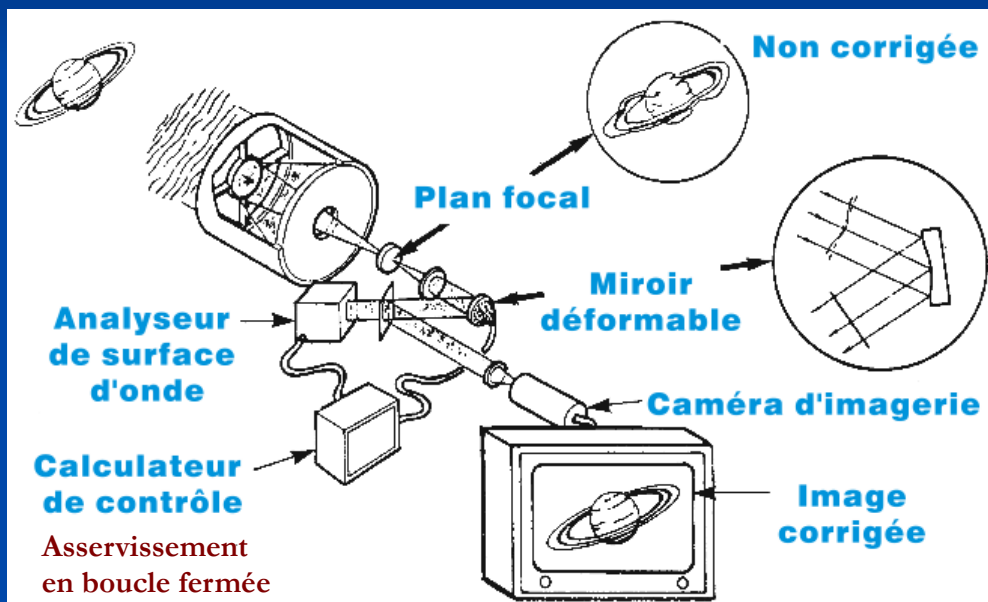
Fluctuations turbulentes de température dans l'atmosphère =  
avances ou retards de phase sur les surfaces d'onde

G. Rousset, Optique / 7/11/2011

5

## Principe de l'optique adaptative (OA)

- Corriger avec un miroir déformable les avances et retards des surfaces d'onde (achromatiques)



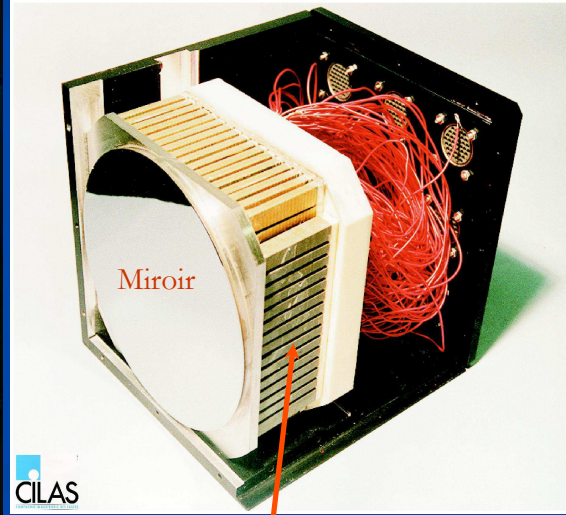
G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011

6

# Un élément clé d'un système d'OA

## Le miroir déformable

- Miroir conjugué de la pupille d'entrée du télescope
- Déformations  $\sim 1$  à  $5 \mu\text{m}$
- De  $\sim 50$  à  $700$  actionneurs
- Fréquence de commande  $> 100 \text{ Hz}$



G. Roux

Actionneurs piézoélectriques

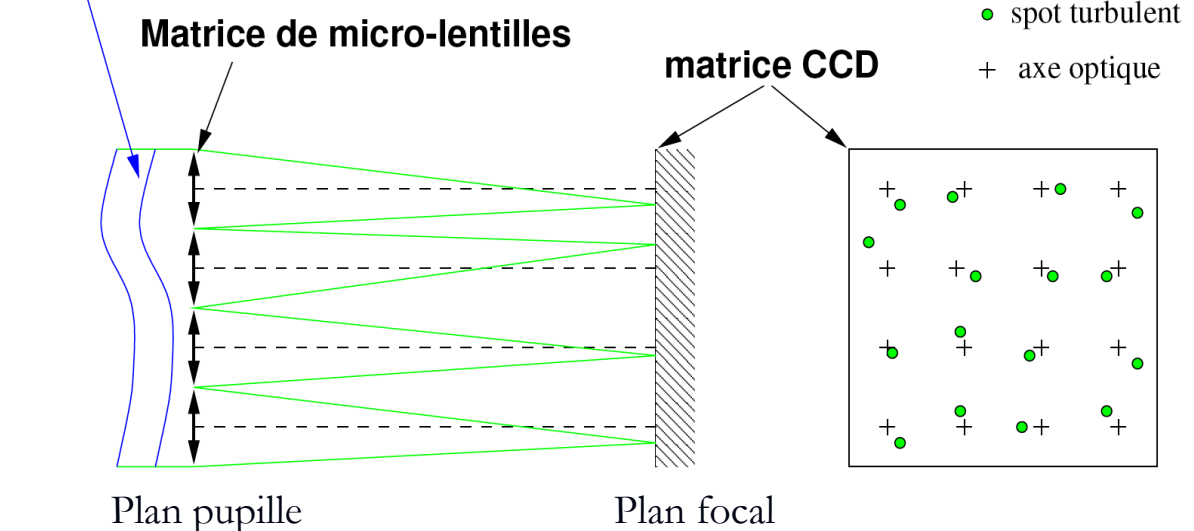
7

# Principe de l'analyseur de surface d'onde

## (Shack-Hartmann)

Rayons lumineux perpendiculaires à la surface d'onde

Front d'onde turbulent



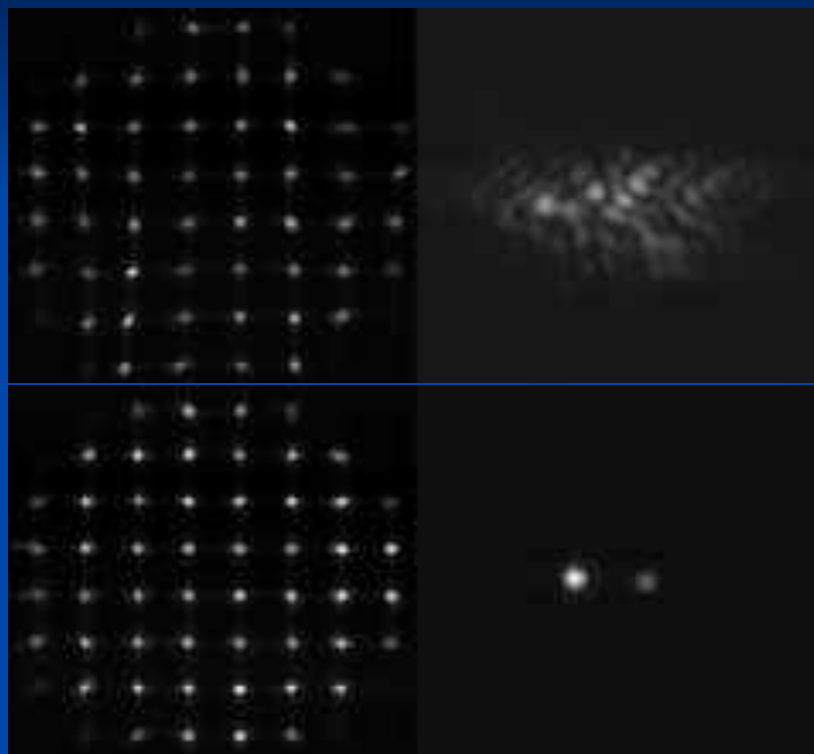
G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011

8

# Turbulence et correction par OA

Analyseur de surface d'onde

Image



Turbulence

Optique adaptative

G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011

9

## FEP longue pose (proche IR) en OA

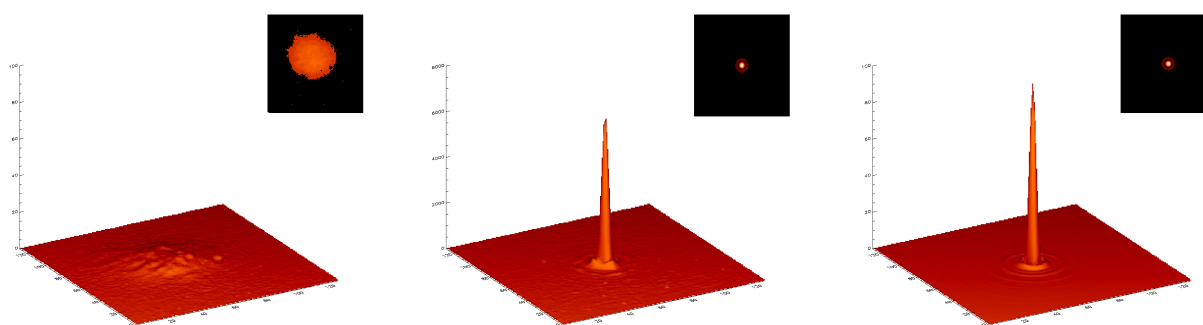


image turbulente

image corrigée ( $SR = 64\%$ )

diffraction

Longueur d'onde d'imagerie :  $2.2\mu m$

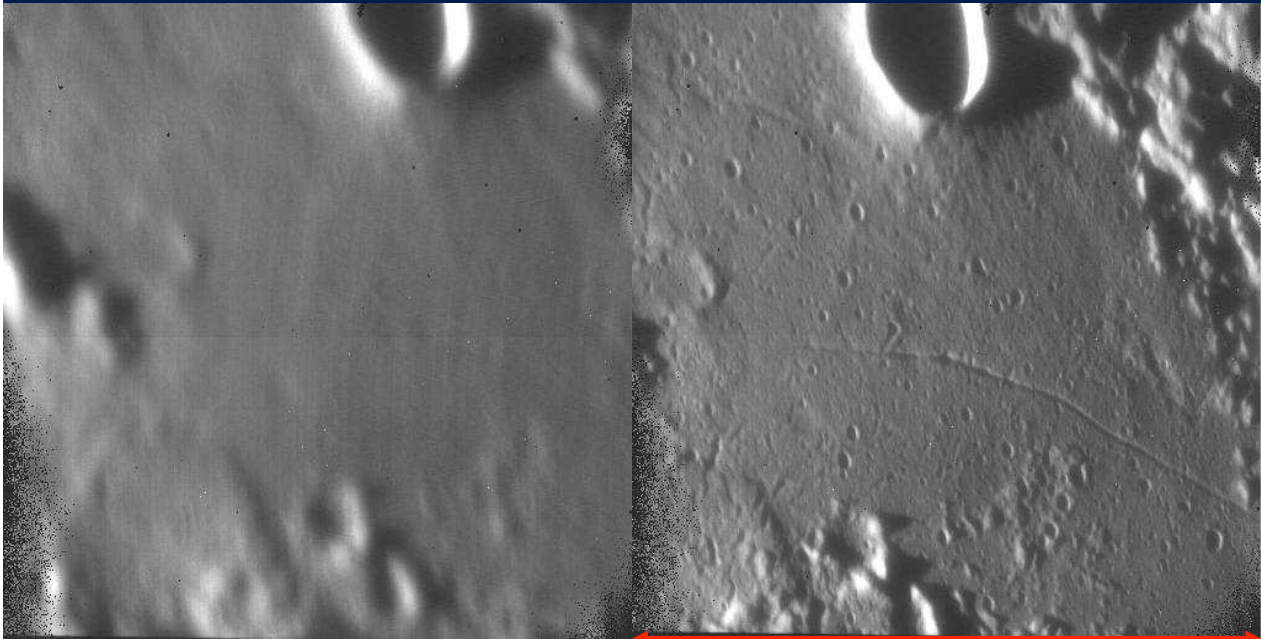
Télescope 8m (VLT),  $r_o = 1m$ ,  $v = 10m/s$   
Système d'OA: 185 actionneurs, fréquence 440 Hz

G. Rousset

Surface d'onde corrigée à mieux que 250 nm

10

# Impact de la résolution sur un objet étendu



G. Rousset, Optique A

Image brouillée par la turbulence

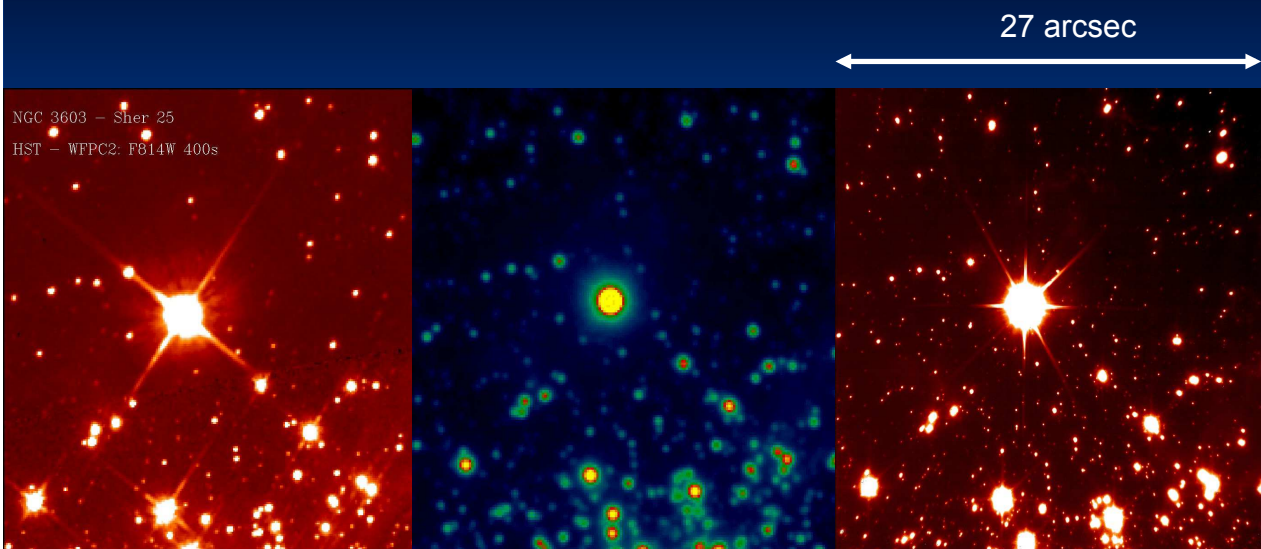
26" = 45 km

Image corrigée par OA

Surface de la Lune à  $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$  au VLT

11

# Apport de l'OA : résolution et détectivité



G. Rousset, Optique Adaptative et

HST  
(I, 400s)

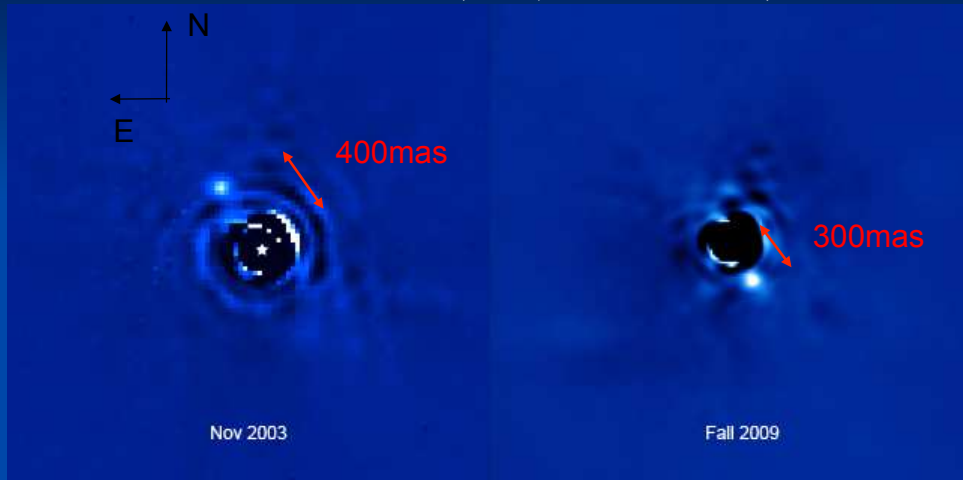
VLT sans OA  
(2,2 $\mu\text{m}$ , 30mn)

VLT avec OA  
(2,2 $\mu\text{m}$ , 300s, SR 56%)

12

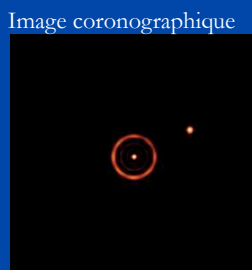
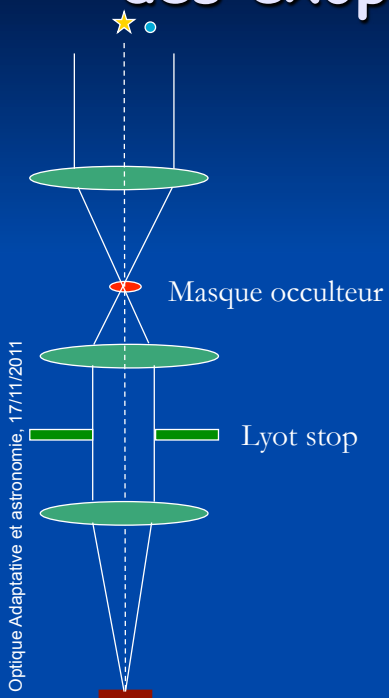
# Détection et image d'une exoplanète

Autour de  $\beta$  Pictoris (étoile jeune à 70 an.-lum.)

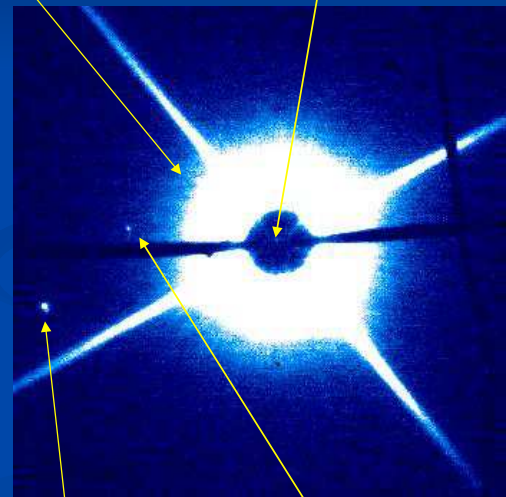


$\beta$  Pictoris-b de période  $\sim 12$  ans  
 $T \sim 1500\text{K}$ ,  $7-11 M_{\text{jup}}$  à  $8-14$  UA  
*Lagrange et al (2009, 2010)*

# La coronagraphie pour l'imagerie des exoplanètes : haut contraste



Halo résiduel      Masque occulteur



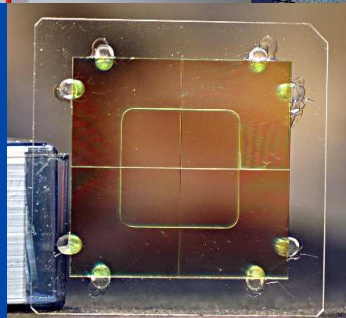
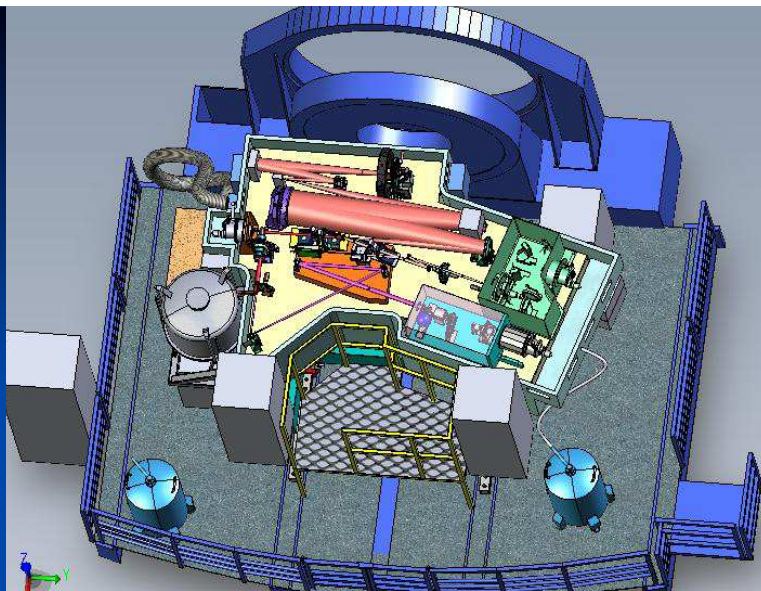
Luminosité à  $10^{-4}$   
 Sép.  $4,8''$

Luminosité à  $10^{-5}$   
 Sép.  $2,8''$

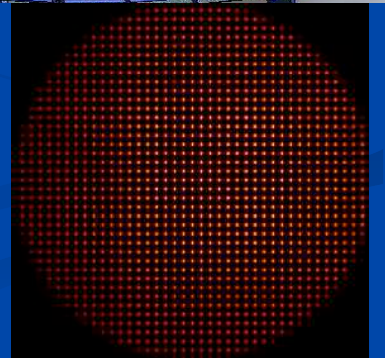
# Projet SPHERE : imagerie des exoplanètes au VLT

G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011

- Haut contraste  $10^6$  à  $10 \lambda/D$
- Mir. Déf. à 1370 actionneurs
- Analyse de surface d'onde dans le visible à la fréquence 1200 Hz
- SR attendu de 90% à  $1,6 \mu\text{m}$   
=> Surf. Onde < 100nm
- Imagerie différentielle, spectroscopie, polarimétrie et coronagraphie de  $0,9$  à  $2,3 \mu\text{m}$
- Nombreux laboratoires européens impliqués



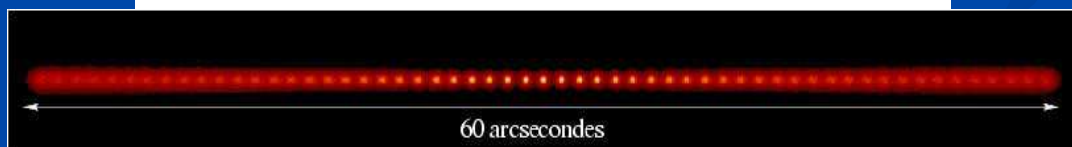
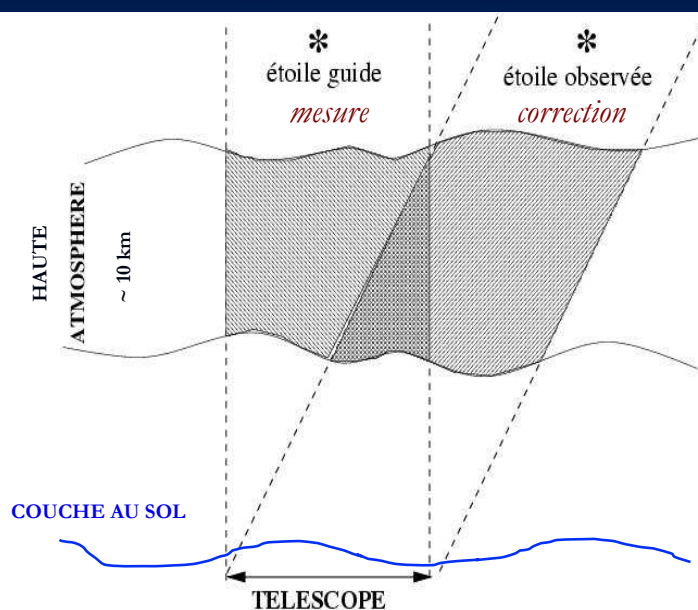
Coronographe de phase 4 quadrants



## Limitation du champ (anisoplanétisme)

Faible corrélation des surfaces d'onde en altitude entre les différentes directions d'observation

Forte corrélation au sol



Variation de la FEP dans le champ

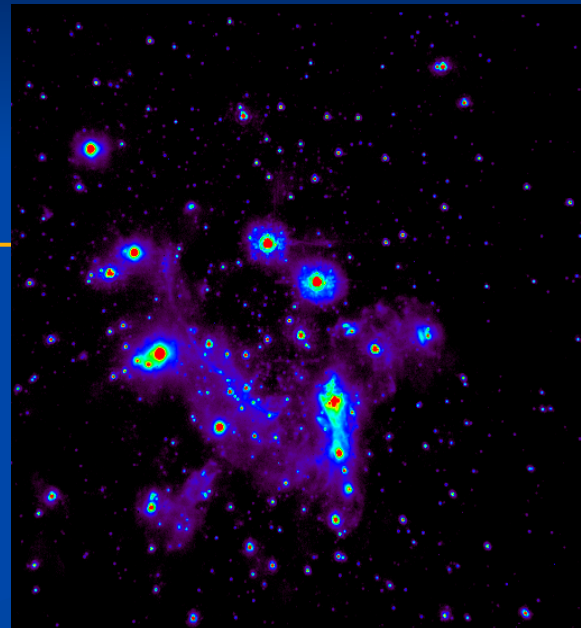
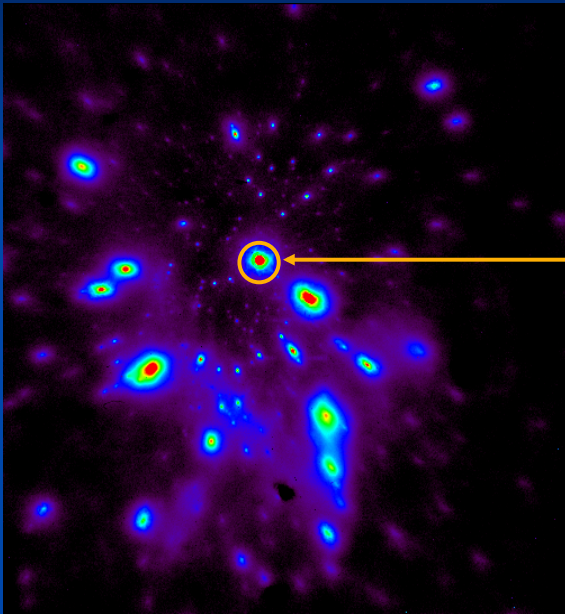
G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011



# Impact de l'altitude de la turbulence

Fortes couches turbulentes à haute altitude

Couches turbulentes à basse altitude



G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011

Image du Centre Galactique (30 arcsec)

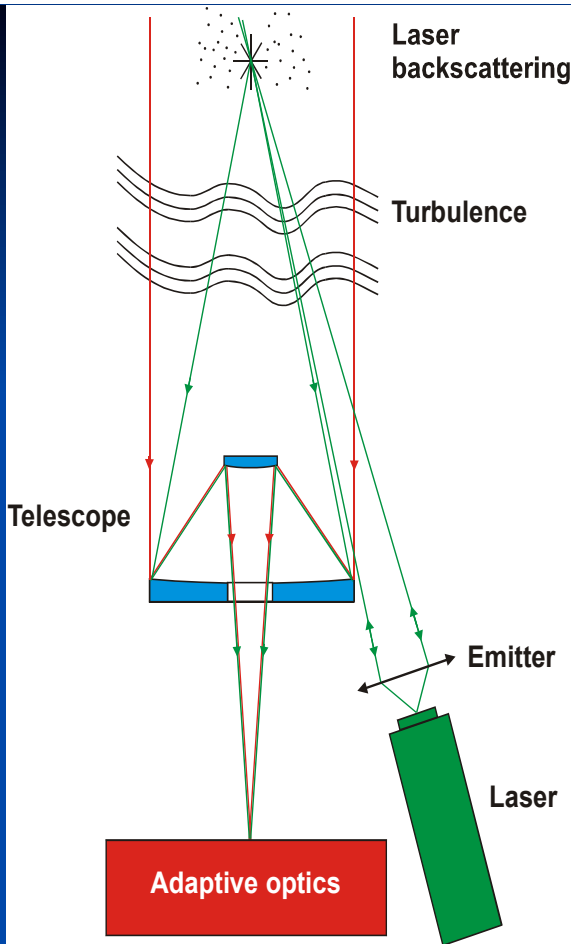
17

## Luminosité des étoiles guides

- Une mesure suffisamment précise requiert de l'ordre de 200 photons détectés par sous pupille
- C'est à dire une étoile guide de magnitude  $\sim 10$  dans le visible (détecteur CCD très sensible)
- Les objets souvent beaucoup plus faibles !!!
- Etoiles guides proches de séparation inférieure à quelques dizaines de sec. d'arc (anisoplanétisme) très difficiles à trouver en général...
- Ainsi **couverture du ciel très faible !**

G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011

18



# Etoile artificielle créée par laser

Rétrodiffusion sur la couche mésosphérique de Sodium entre 80 et 100 km d'altitude

Quelques problèmes :

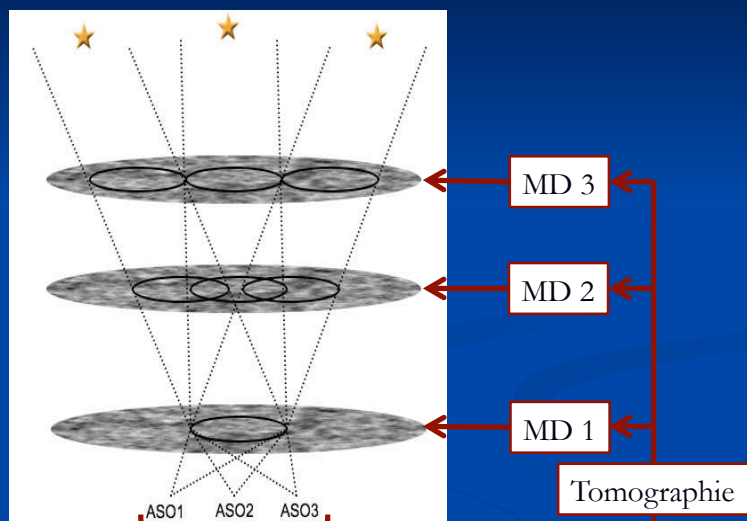
- angle d'arrivée non mesurable
- effet de cône
- source 3D fluctuante...



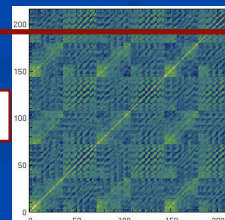
# OA pour le grand champ ! OA dite multi-conjuguée

Synthèse du volume turbulent :

- Mesurer les surfaces d'onde dans plusieurs directions (étoiles lasers)
- Reconstruire le volume turbulent par tomographie
- Corriger par plusieurs miroirs déformables conjugués aux altitudes prépondérantes

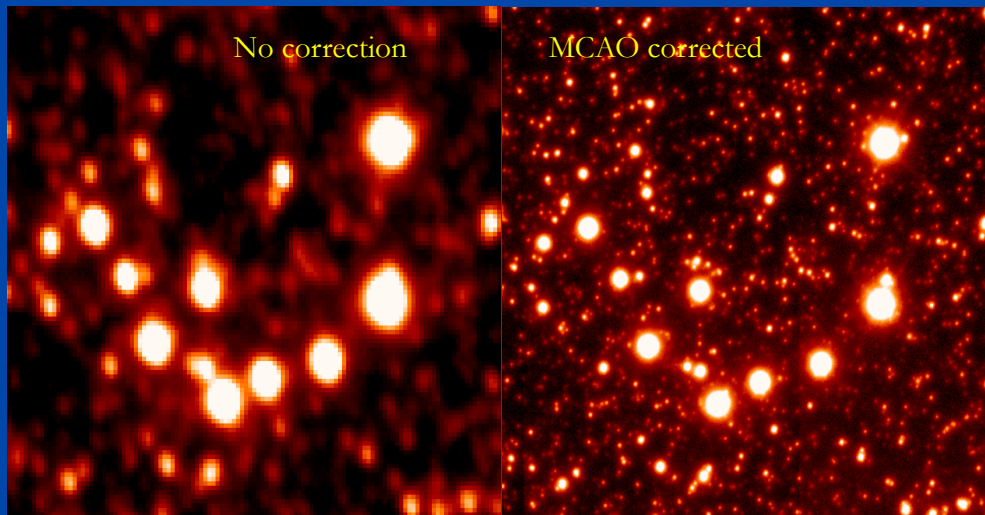


Corrélation des mesures



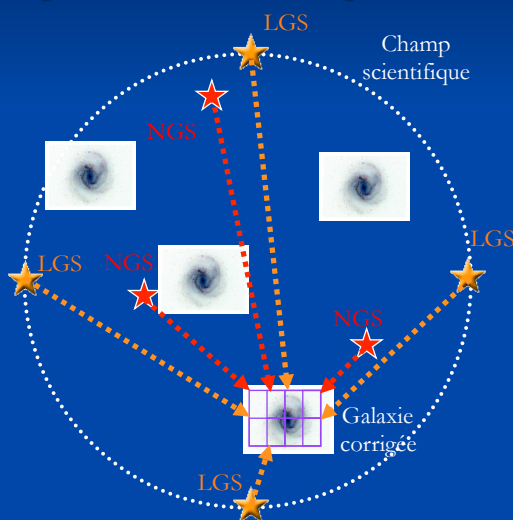
# OA multi-conjuguée : démonstration au VLT (ESO)

- Tél. 8m, 2 MDs à 60 actionneurs, 3 analyseurs, étoiles naturelles guides à 2 arcmin, seeing 0,7 arcsec
- Omega Centauri ( $15^2 \text{ arcsec}^2$ ) :  $2,2 \mu\text{m}$ ,  $\text{SR} \sim 20\%$
- Marchetti et al. 2007

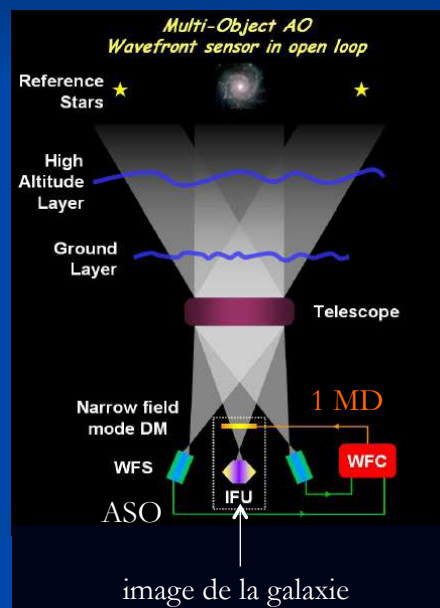


# OA très grand champ ! OA dite multi-objet

Observer plusieurs dizaines de galaxies à grand redshift dans un champ de 10 min. d'arc pour accéder à une statistique suffisante



Multi étoiles lasers et naturelles  
Tomographie  
1 MD par objet en boucle ouverte

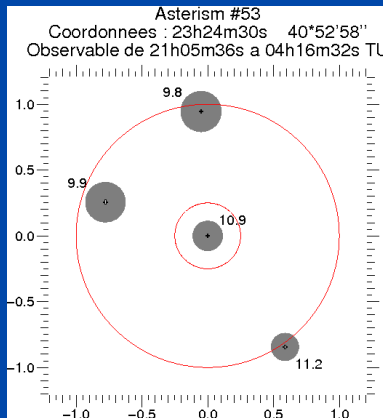
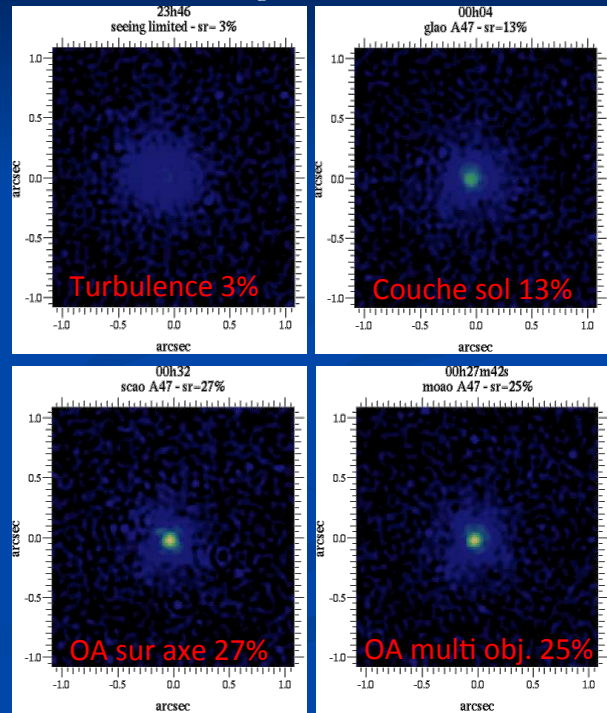


# Démonstration de l'OA multi-objet

WHT (4,2m) aux Iles Canaries

- 3 ASO sur étoiles naturelles
- Tomographie
- 1 miroir déf. (52 action.) sur l'étoile sur axe en boucle ouverte
- Gendron et al., 2011

Images à 1,5  $\mu\text{m}$



G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011

# Les très grands télescopes au sol équipés d'OA de première génération



G. Rousset, Optique Adaptative et astronomie, 17/11/2011

# Les extrêmement grands télescopes

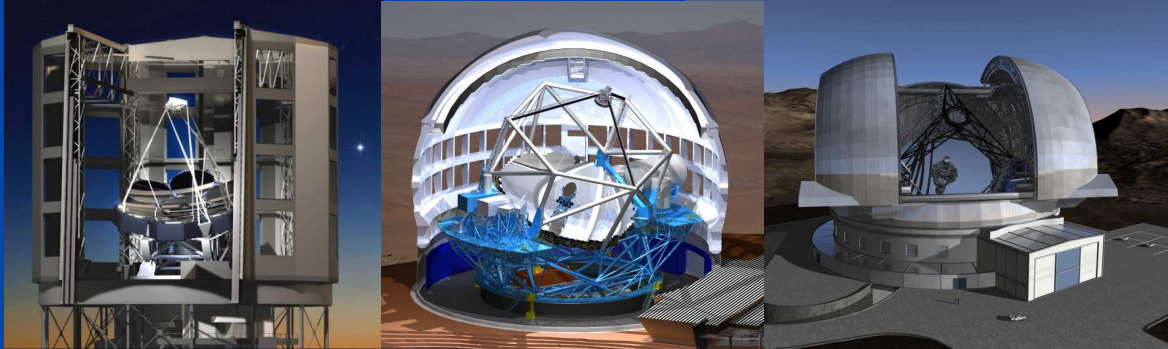
Horizon 2020-2025

Deux projets aux USA et un en Europe :

Giant Magellan Tel.  
GMT, 25m, Chili

Thirty Meter Tel.  
TMT, 30m, Hawaii

European Extremely  
Large Telescope  
E-ELT, 40m, Chili



Conçus dès maintenant avec OA intégrée !

## Conclusion

- L'optique adaptative technologie clef en astronomie
- Relever le défi des OA des extrêmement grands télescopes
- Le très grand nombre d'actionneurs
- Les problématiques de l'étoile laser
- Le grand champ
- Le haut contraste

**Merci pour votre attention !**

