



# Les Optiques Adaptatives de l'E-ELT

## *Activités en France*

Michel Tallon

*CRAL, Lyon France*

Avec l'aide de:

Jean-Marc Conan (ONERA)

Thierry Fusco (ONERA)

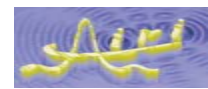
Eric Gendron (LESIA)

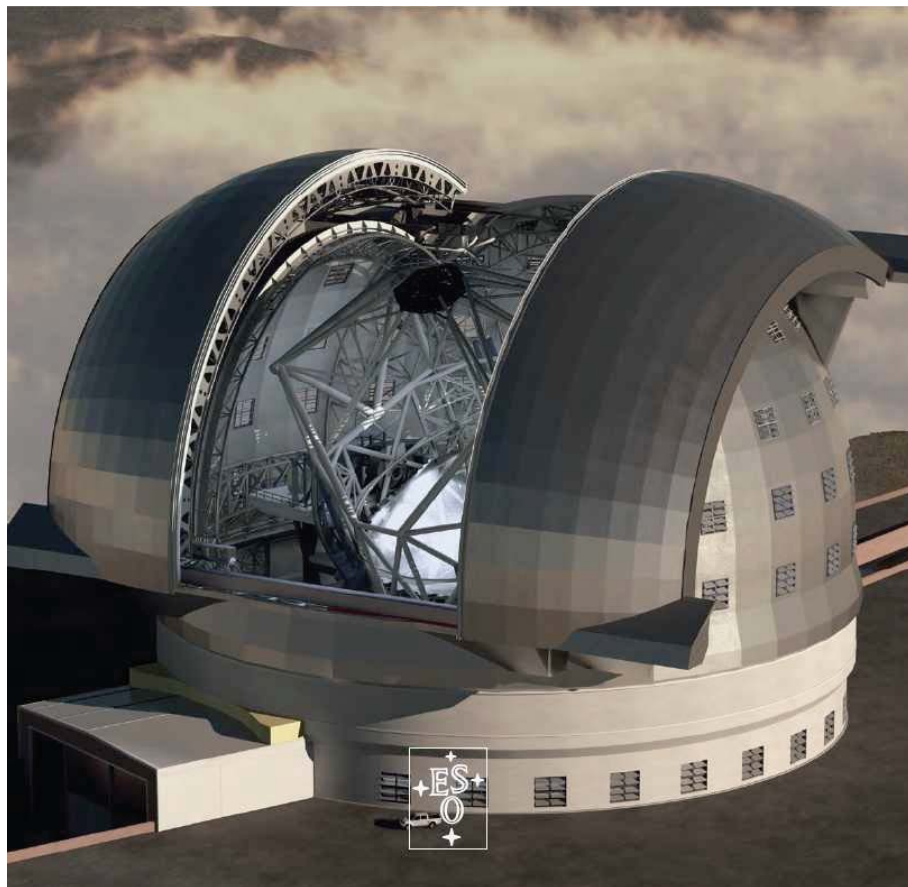
Maud Langlois (CRAL)

Gérard Rousset (LESIA)

Brice Le Roux (LAM)

Christophe Vérinaud (LAOG)



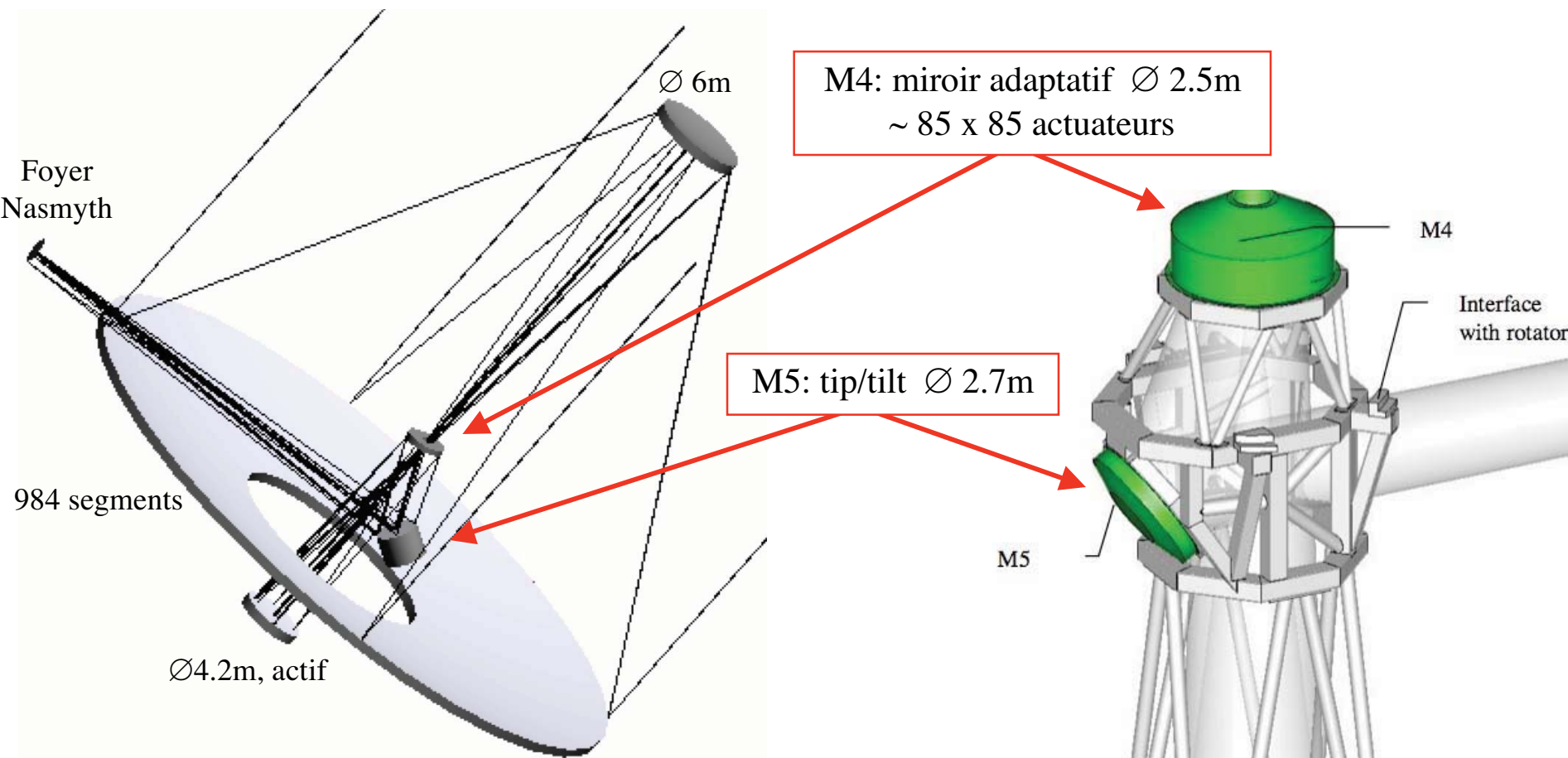


- Diamètre: **42-m**
- Localisation: **Cerro Armazones**
- FOV: **10'**
- Monture: **Nasmyth**
- En opération: **2018**
- Foyers ins.: **9**
  - (dont **2 invariants de gravité**
  - **et 1 coudé**)

## Autres projets:

- TMT
  - 30 m, 2018, Mauna Kea
  - USA + Canada + Japon + ...
- GMT
  - ~24.5 m, 2018, Las Campanas
  - USA + Australie + Corée

# L'Optique Adaptative dans l'E-ELT



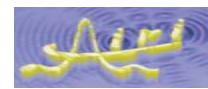
- Enjeux:

- passage  $\sim \text{Ø} 10\text{m} \rightarrow \text{Ø} 42\text{m}$
- effet du vent  $\gg$  turbulence atmosphérique
- maintenir la forme du télescope (segments !)

# instruments E-ELT → optiques adaptatives

	type	$\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	résol. spect.	champ	Opt Adapt
CODEX	spectro HR visible (stabilité < 2cm/s/30 ans)	0.37 - 0.71	135000	0.8"	tip/tilt
SIMPLE	spectro HR NIR	0.8 - 2.4	130000	fente dans ~4"	LTAO
HARMONI	spectro intégral de champ (~MUSE)	0.8 - 2.4	4000, 10000, 20000	~1" - 10" 4-40 mas/pix	LTAO
METIS	spectro-imageur IR-moyen (+polar.)	2.9 - 14	900-5000 IFS ~100000	18" 15-30 mas/pix	LTAO
MICADO	spectro-imageur NIR ( $\lambda_K/D$ )	0.8 - 2.4	< 3000	< 53" 3-5 mas/pix	MCAO
OPTIMOS	spectro multi-fentes (> 100) (+imageur ?)	0.4 - 1.7	1000 10000	5' - 7'	GLAO
EAGLE	spectro intégral de champ multi-objets (~20 IFU)	0.8 - 2.4	4000 & 10000	20 IFU 1.7" dans > 5' 38 mas/pix	MOAO
EPICS	Haut-contraste (~SPHERE)	0.95 - 1.65	> 50	~ 2"	XAO

-> cf. présentation Jean-Gabriel Cuby jeudi matin



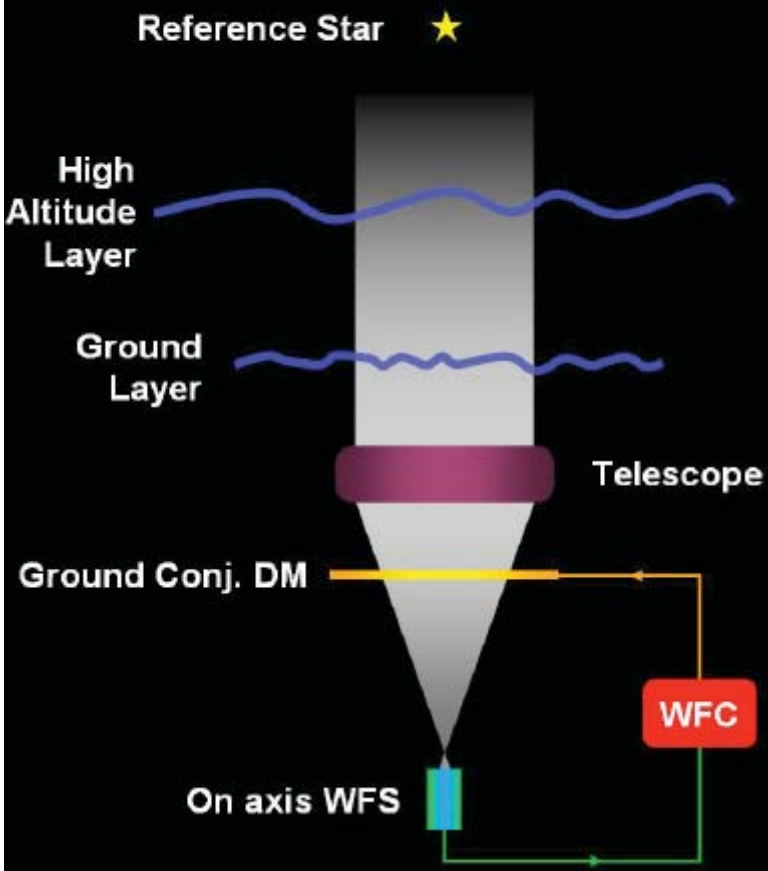
# Couverture du ciel → effet de cône

- Couverture du ciel 1% - 2%
- Champ: 10"-20" en K



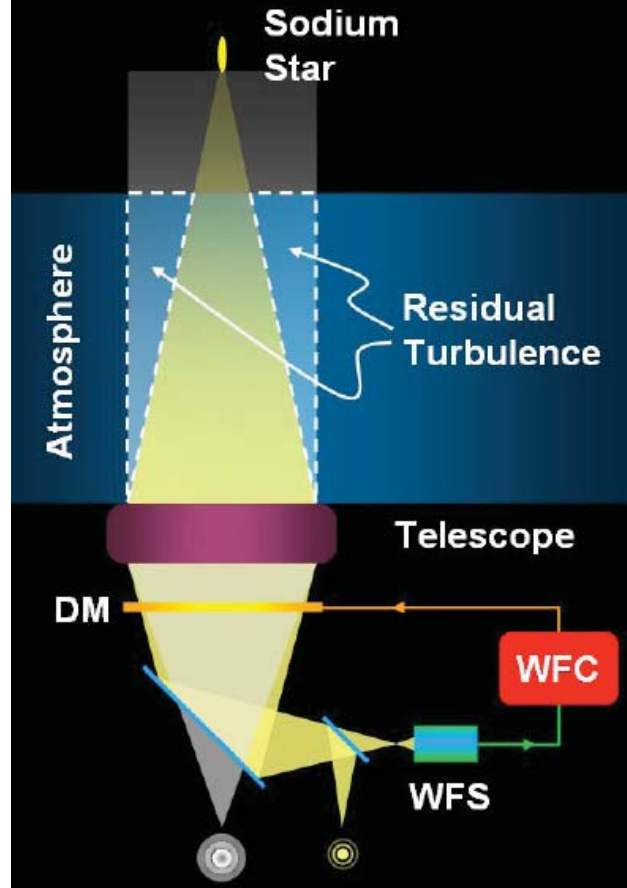
Etoile laser pour augmenter la couverture du ciel

## Single Conjugated AO

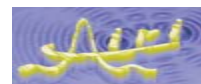


© E. Marchetti/ESO/2004

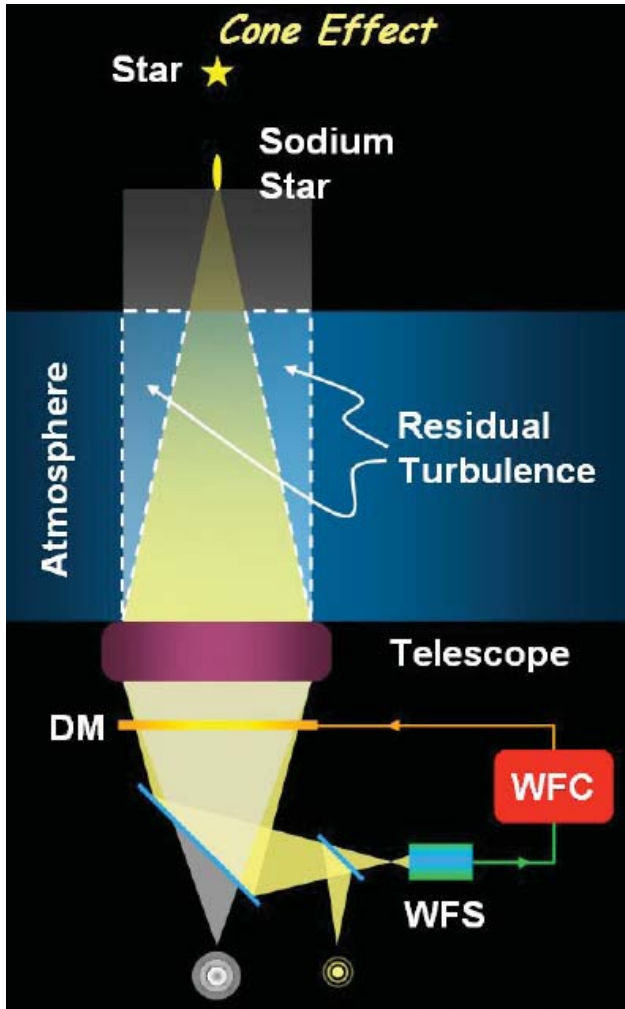
## Cone Effect



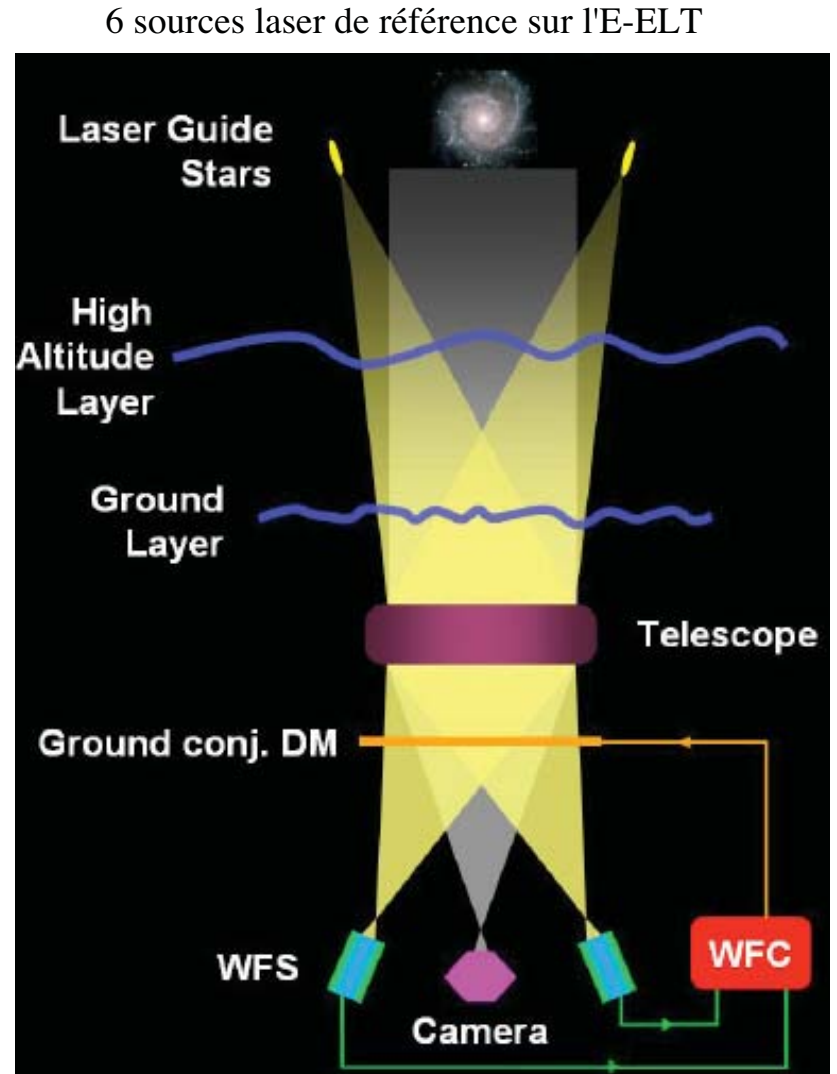
© E. Marchetti/ESO/2004



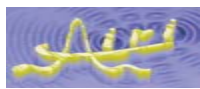
# effet de cône → tomographie atmosphérique



© E. Marchetti/ESO/2004

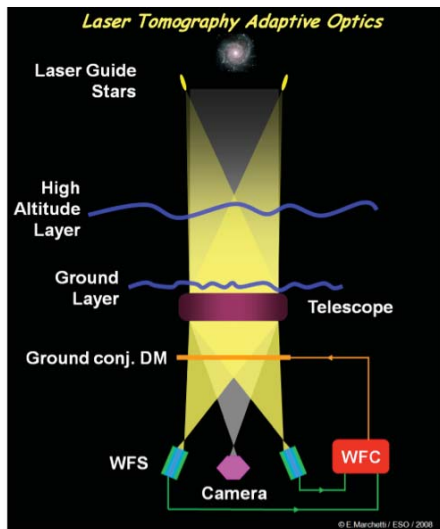


© E. Marchetti/ESO/2004

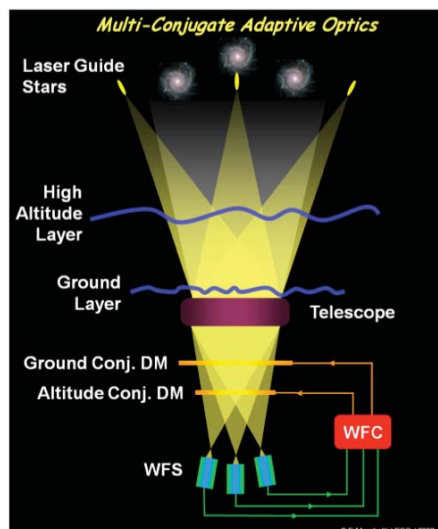




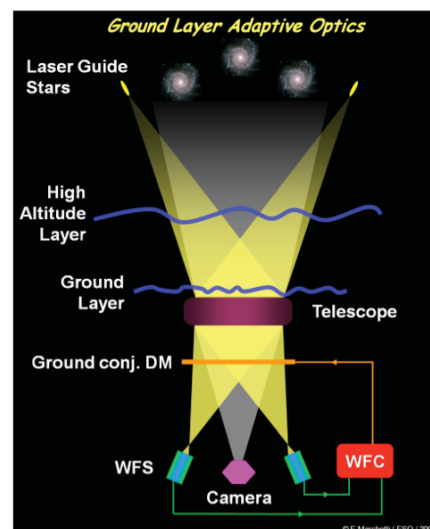
## LTAO (ATLAS)



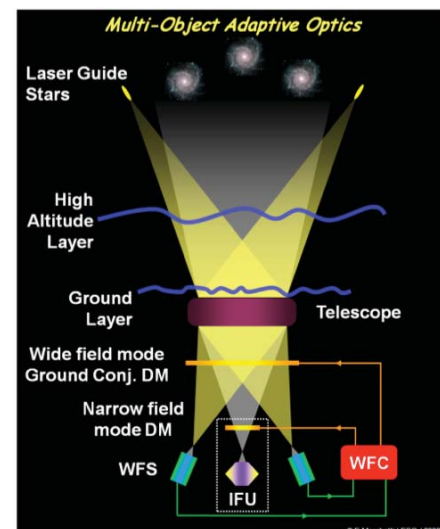
## MCAO (MAORY)



## GLAO



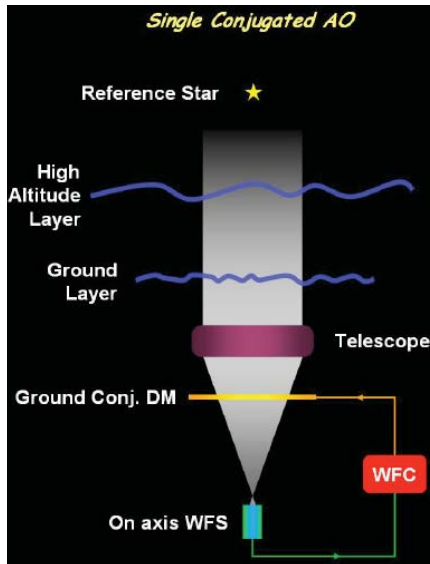
## MOAO (EAGLE)



AO system	Champ corrigé	Couverture du ciel en K	Nombre lasers	
LTAO (ATLAS)	30"	~98%	6	HARMONI, METIS, SIMPLE
MCAO (MAORY)	1'	> 50%	6	MICADO
GLAO	~ 7'	~ 100%	4	OPTIMOS
MOAO (EAGLE)	20 IFU 1.7" dans > 5'	> 90%	6	
XAO (EPICS)	~ 2"	échantillon	-	
SCAO	10"-20" (K)	~ 1%	-	

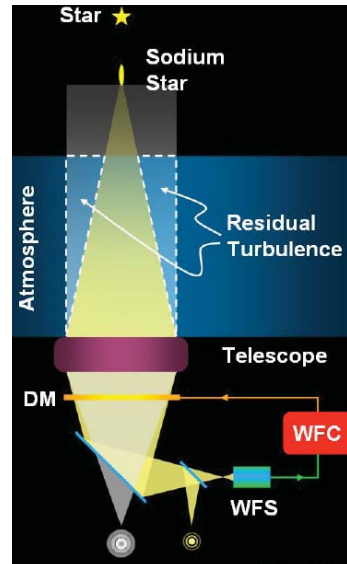
# Savoir faire sur les télescopes de ~10m

## ✓ SCAO (& XAO)



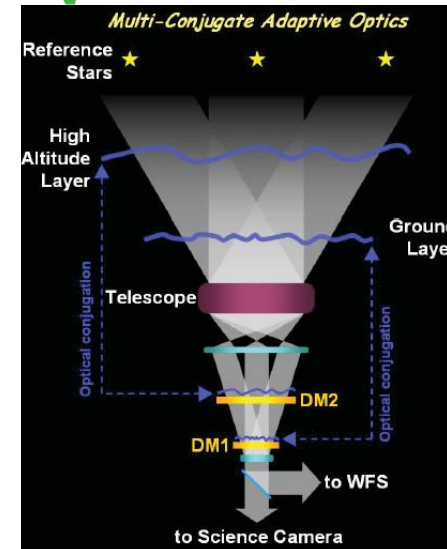
- VLT
- Keck
- Gemini
- Subaru
- ...

## ✓ SCAO + étoile laser



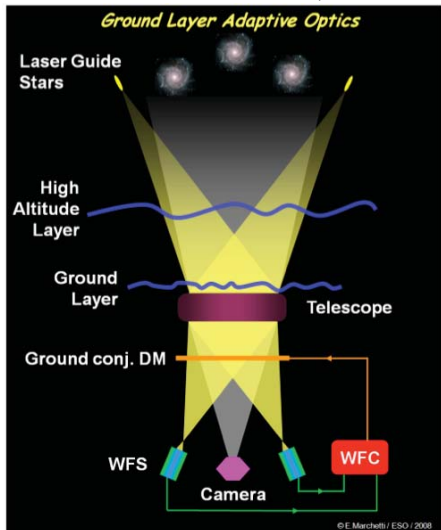
- Keck
- Lick
- SOR
- ...

## ✓ MCAO - NGS

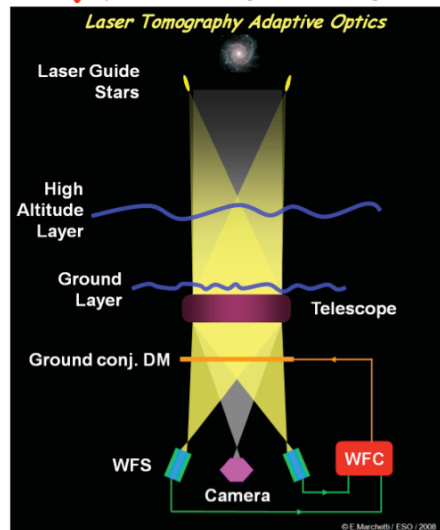


- MAD
- AO solaire

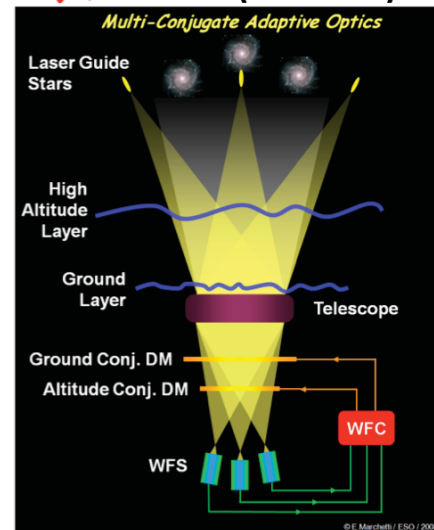
## ✓ GLAO (@ MMT)



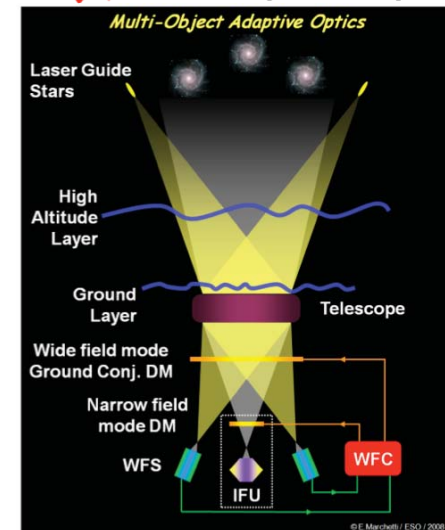
## ✗ LTAO (ATLAS)



## ✗ MCAO (MAORY)



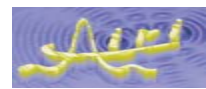
## ✗ MOAO (EAGLE)



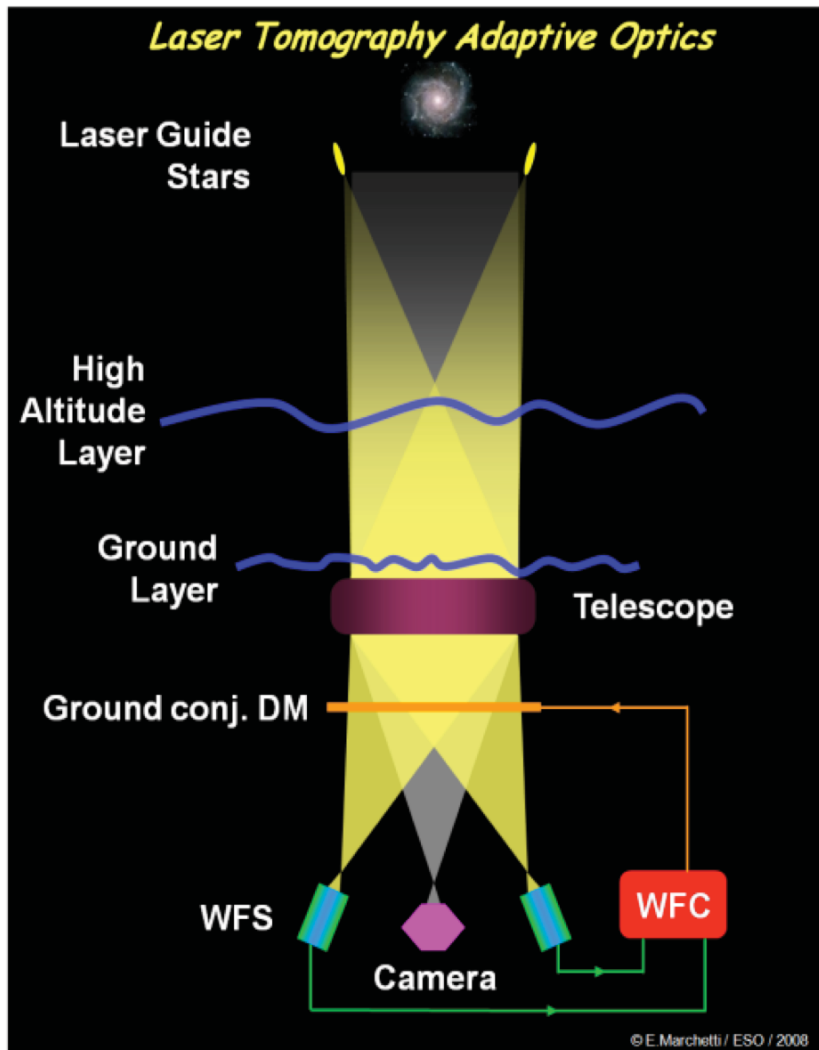


# Résumé du contexte

- Passage  $\sim \varnothing 10\text{m} \rightarrow \varnothing 42\text{m}$
- Effet du vent  $\gg$  turbulence atmosphérique
- Des architectures d'OA très variées
  - Une OA en permance dans le télescope
- Nouvelles architectures OA complexes qui n'ont jamais encore vu sur le ciel...



# Etude ATLAS / objectifs

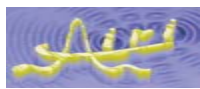


- **LTAO: Laser Tomography Adaptive Optics**
  - Correction avec miroir déform. du télescope (~85 x 85 actuateurs)
- **Objectifs**
  - Strehl > 50% sur l'axe en K
  - Couverture du ciel > 60%
  - Champ dégagé >  $\varnothing$  30"
  - 0.5 - 13.5 $\mu$ m (pour différents instruments)
- **Instruments**
  - HARMONI, METIS, SIMPLE, (MICADO ?)



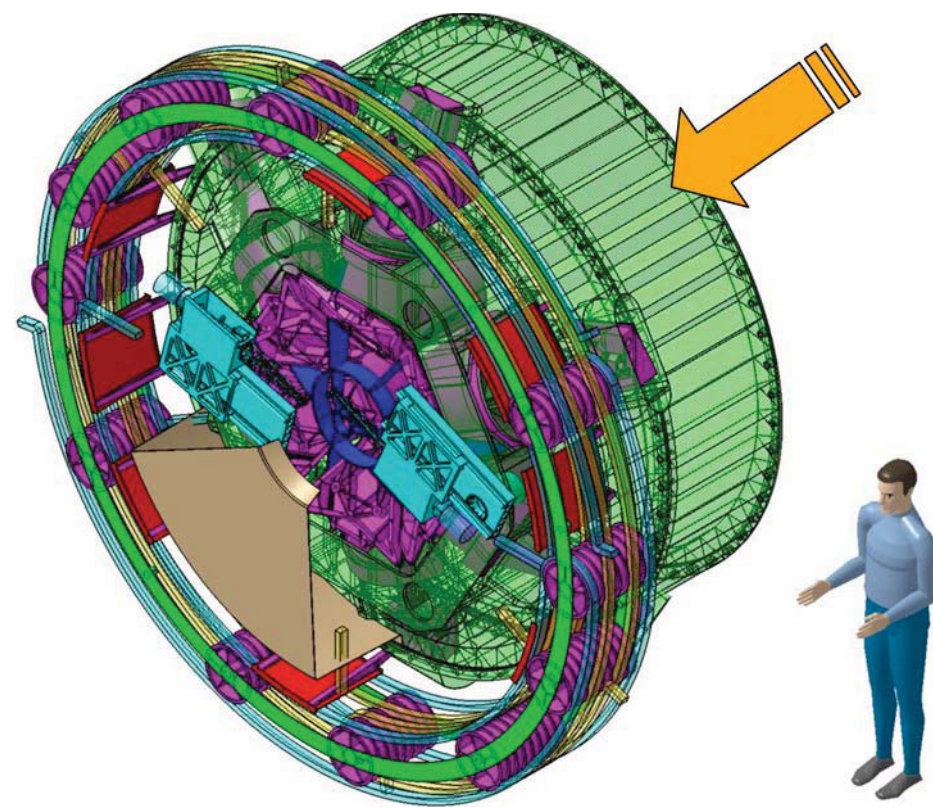
*Advanced Tomography  
with Laser for  
AO systems*

*ONERA, LESIA, GEPI,  
UK-ATC (+ LAM)*

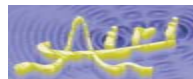


# Etude ATLAS / résultats

Pupil & Field rotation FoV Pupil	Mechanical derotation Numerical derotation
LGS Number Position Sky position	6 4'20" Fix w.r.t. sky objects
LGS WFS Detector Sampling freq RON Centroiding	SH 84x84 1000x1000 pixels 500 Hz <3e- Correlation
NGS WFS Bandwidth NGS FoV Sampling freq RON Detector Truth sensor Dedicated $\mu$ DM	LOFPS H+Ks 30'' -> 2' $\emptyset$ 500 Hz < 6e- Hawaii 1-RG Yes 30x30 / 1 per channel
RTC Control law (HO) Control law (LO)	Split tomography POLC Kalman
Calibration (IM)	On sky
Cn <sup>2</sup> / Na estimation	WFS data



- Strehl 52% en K sur l'axe sur 98% du ciel
  - > 97 % @ lat < 60°
  - > 92 % @ lat > 60°
- 6 étoiles laser sur un cercle de 4'20"
- + 2 étoiles "naturelles"



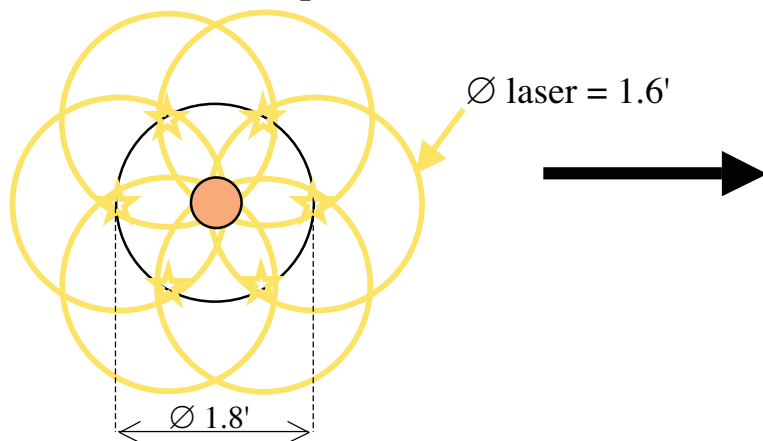
# Etude ATLAS / configuration des faisceaux

Vue des faisceaux au foyer du télescope

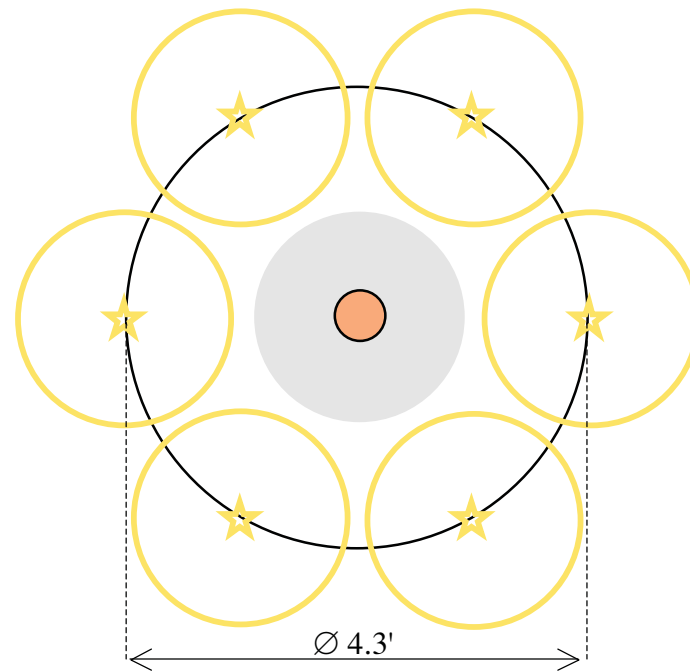
- $\varnothing$  laser = 1.6'

  $\varnothing$  30" dégagé de toute optique

**Solution LTAO optimale**



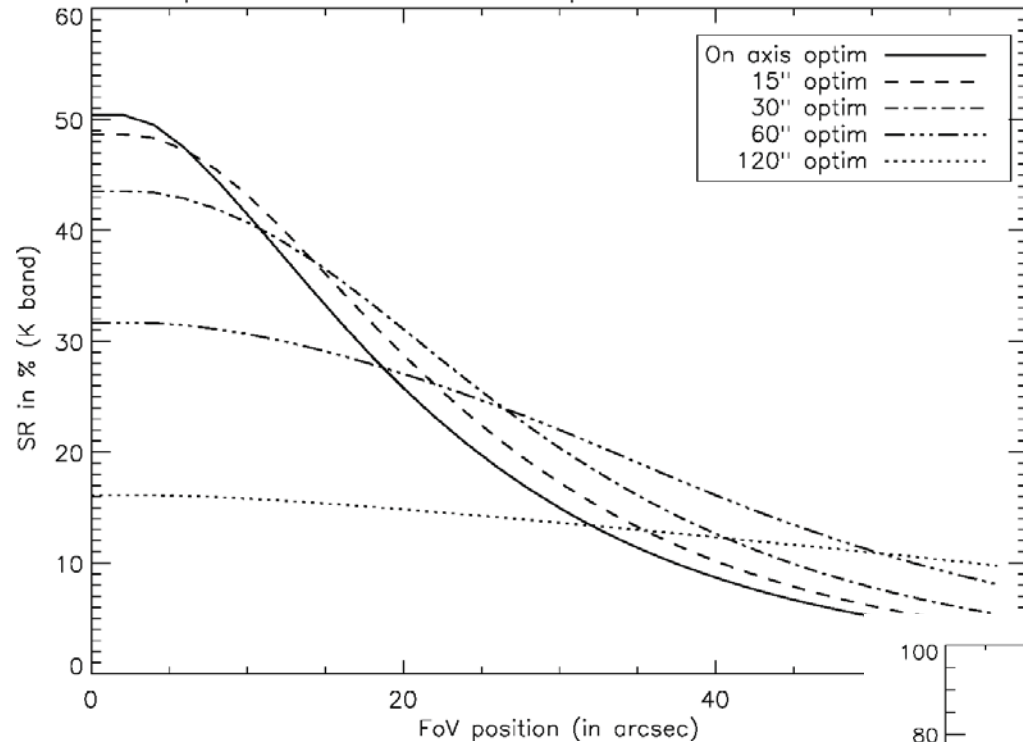
**Solution retenue, pour séparer les faisceaux**



- $\varnothing$  30" dégagé
- Séparation des faisceaux laser sans dichroïque
- => configuration MCAO...

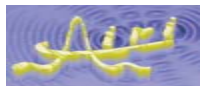
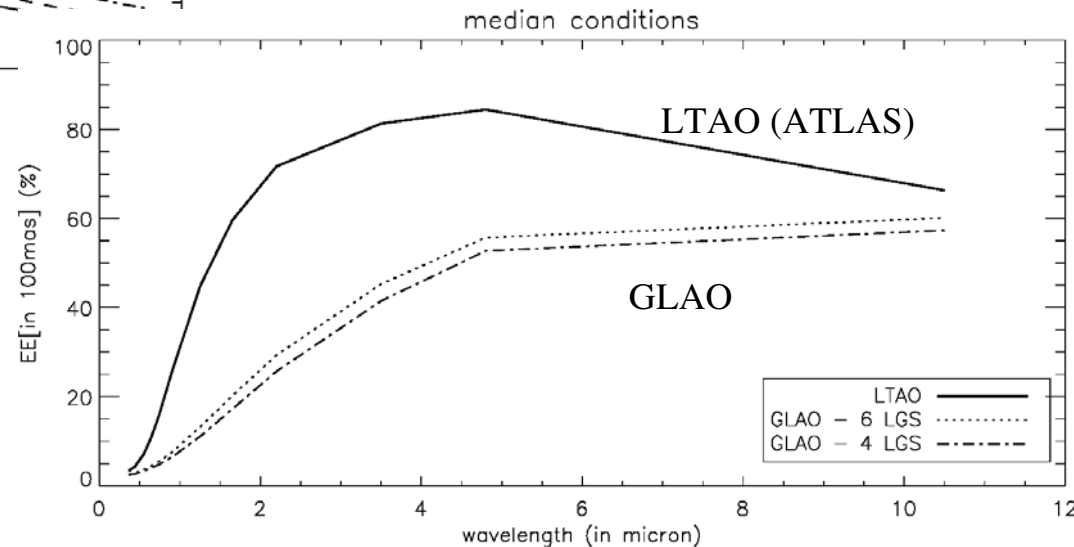
# Etude ATLAS / optimisation de la correction

ATLAS performance for various optimisation in the scientific FoV



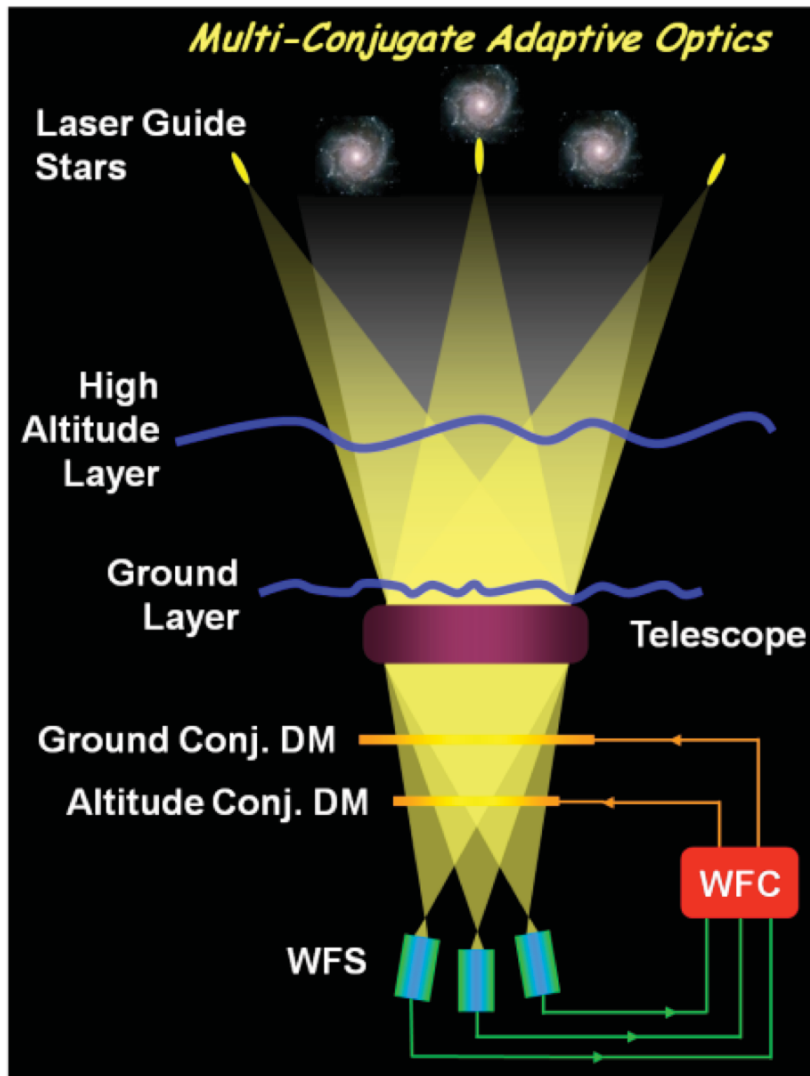
- Optimisation de la correction avec un seul miroir déformable
  - Après reconstruction tomographique
  - Compromis entre correction sur l'axe et uniformité du champ
- Meilleure performance que GLAO

Energie encerclée dans 100 mas





# Etude MAORY / objectifs



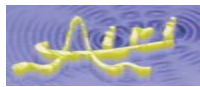
© E. Marchetti/ESO/2004

- MCAO: Multi-Conjugate Adaptive Optics
  - Correction avec plusieurs miroirs (3 ici)
- Objectifs
  - Strehl > 50% en K dans tout le champ
  - Champ *uniforme*  $\varnothing$  1' (corrigé  $\rightarrow$   $\varnothing$  2' )
  - Couverture du ciel > 50% au pôle galactique
  - 0.8 - 2.4  $\mu$ m
- Instruments
  - MICADO, (SIMPLE ?)



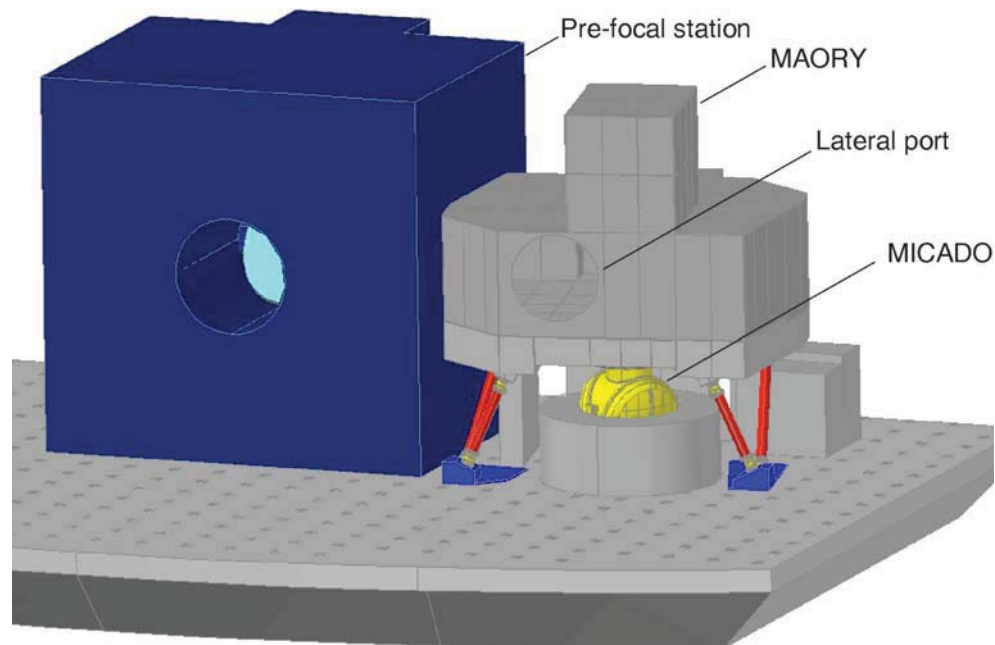
**MAORY**  
Multi conjugate Adaptive Optics RelaY

INAF + Univ. Bologne, ONERA, ESO



# Etude MAORY / résultats

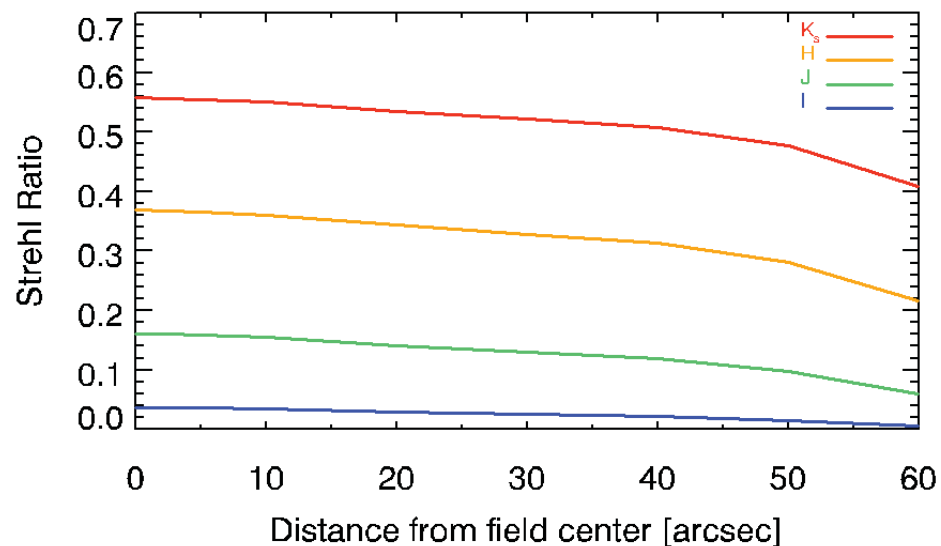
Pupil & Field rotation	
FoV	Mechanical derotation
Pupil	Numerical derotation
DM	M4/M5, h=4km, h=17.5km
Sky position	Fix w.r.t. sky objects
LGS	
Number	6
Position	$\varnothing 2'$
Sky position	Fix w.r.t. telescope pupil
LGS WFS	SH 84x84
Sampling freq	500 Hz
RON	$< 3e-$
Centroiding	Correlation
NGS WFS	
number	3
NGS FoV	$< \varnothing 2.6'$
bandwidth	H
Truth sensor	Yes
RTC	Split tomography
-Control law (HO)	POLC
-Control law (LO)	Kalman



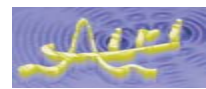
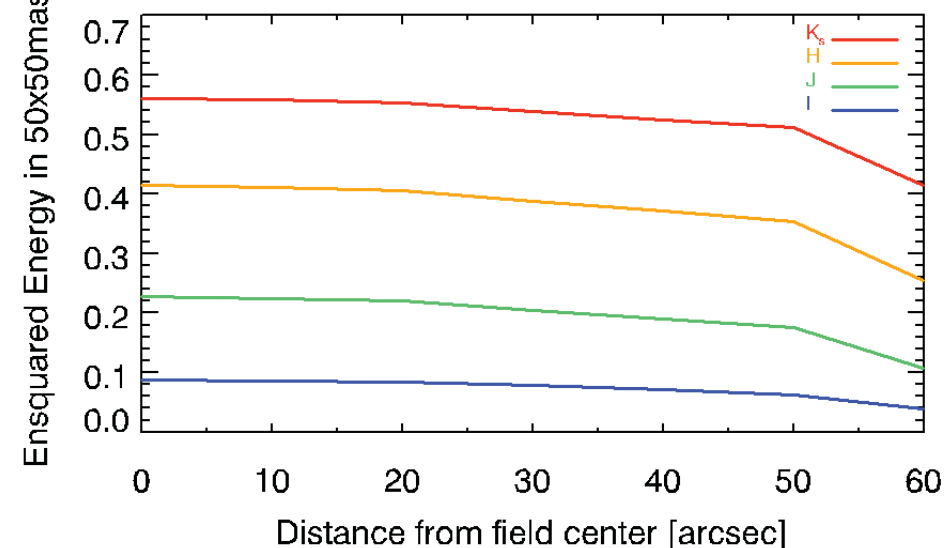
- 6 étoiles lasers sur un cercle de  $\varnothing 2'$ 
  - + 3 étoiles naturelles
- Séparation laser/ciel par dichroïque @  $0.6 \mu\text{m}$
- En moyenne en K sur champ  $\varnothing 2'$  :
  - Strehl 53% sur 40% du ciel (pôle galactique)
  - Strehl 41% sur 80% du ciel (pôle galactique)

# Etude MAORY / uniformité du champ

Strehl ratio

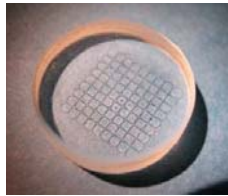


Energie dans 50x50 mas<sup>2</sup>



# Banc HOMER (ONERA)

Wide Field WFS  
(1002x1004 pixels)  
ANDOR EMCCD

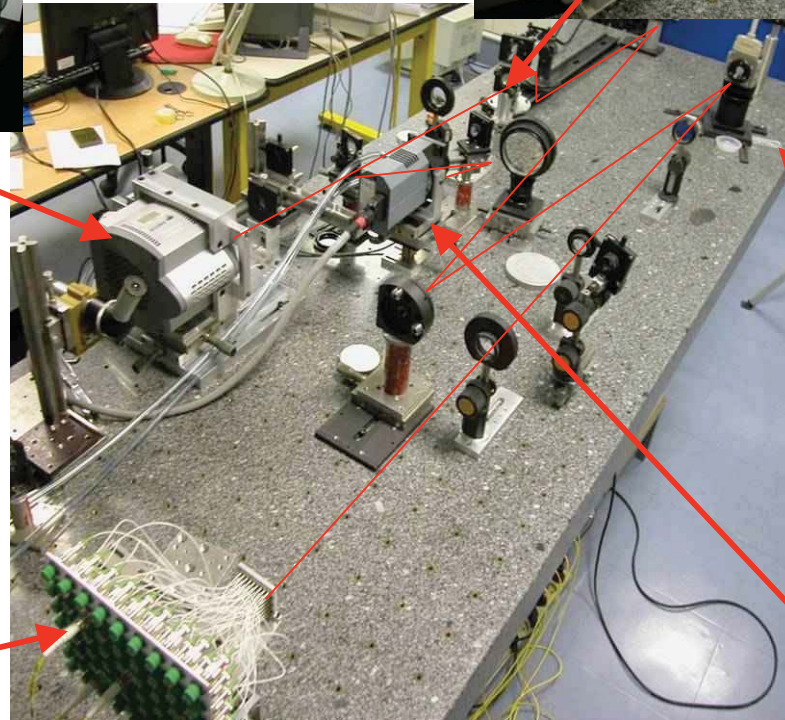


7x7 microlens array  
Manufactured at ONERA  
 $F = 30\text{mm} - d_{\mu l} = 1.1\text{mm}$

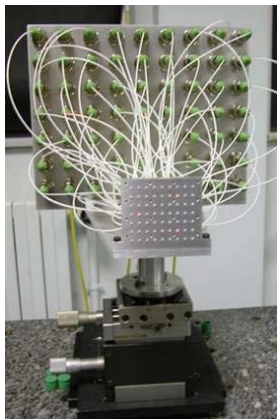
Second DM  
88 actuators  
ALPAO



RTC PC-linux  
Shaktiware



Ground layer DM (52  
actuators, ALPAO  
technology)



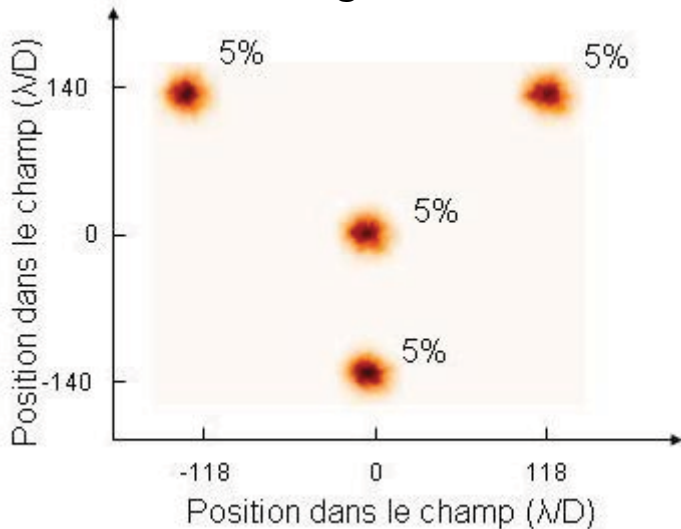
Light source with reconfigurable  
positions of laser

Visible Imaging camera  
(1024x1024 pixels)

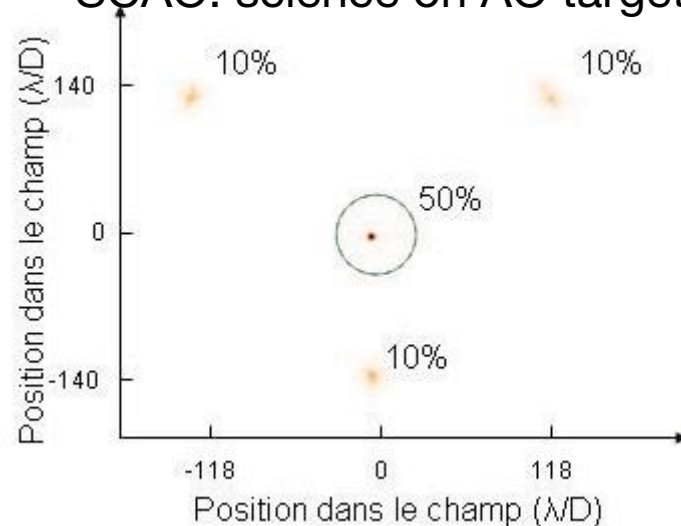
$\lambda = 635\text{ nm}$   
 $F_{\text{ech}} < 25\text{ Hz}$

# Tests sur le banc HOMER (ONERA)

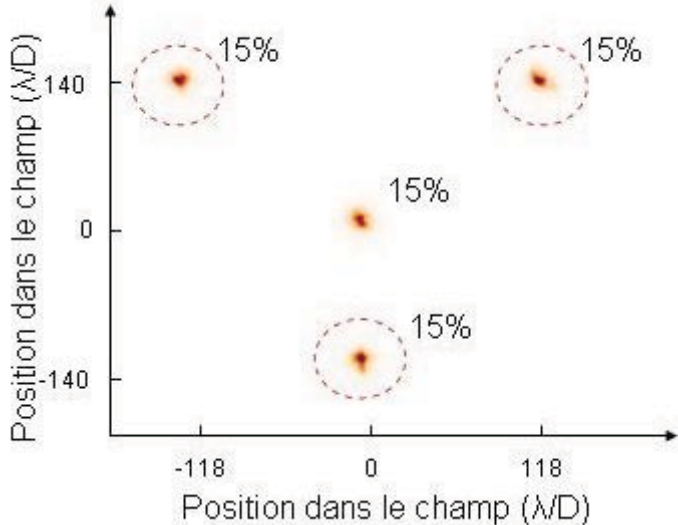
Seeing-limited



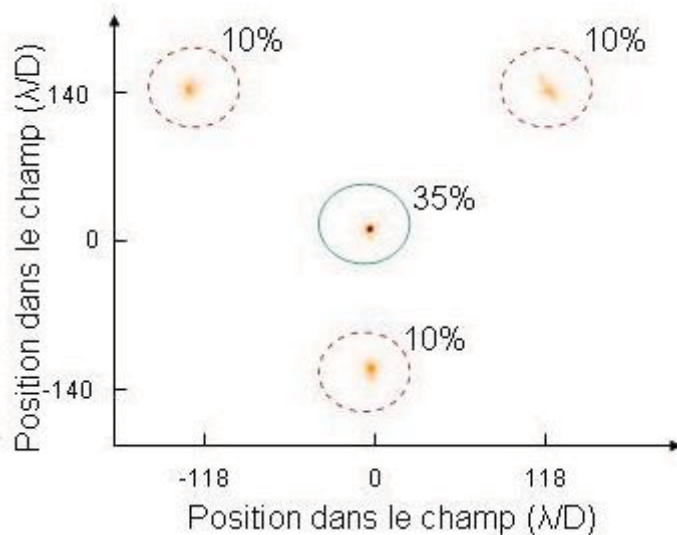
SCAO: science on AO target



GLAO: wide-field science

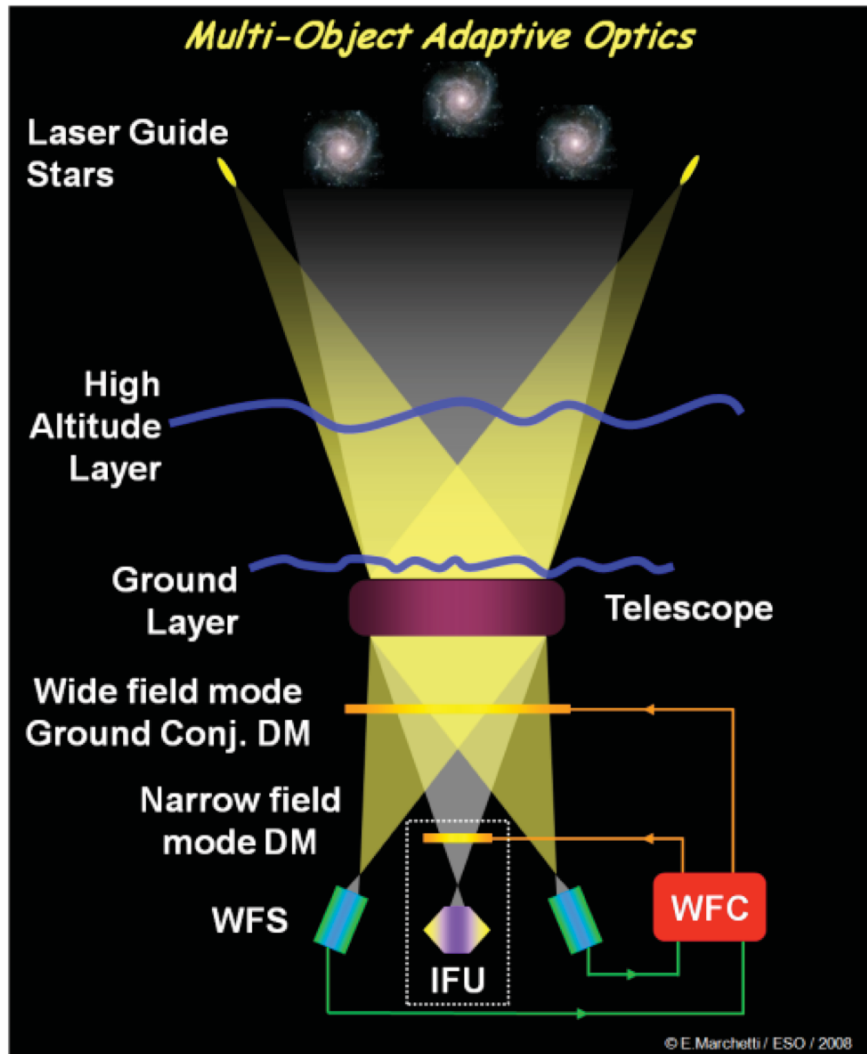


LTAO: science away from AO





# Etude EAGLE / objectifs



© E. Marchetti/ESO/2008

- MOAO: Multi-Object Adaptive Optics
  - miroirs M4/M5 du télescope (boucle fermée)
  - 1 miroir déform. / sous-champ corrigé (x20)
    - *boucle ouverte*
    - intégrés dans l'instrument
- Objectifs
  - résolution améliorée > seeing (pas Strehl)
    - > 30% énergie d'un point source dans 75x75 mas<sup>2</sup>
  - 20 champs ~1.7"x1.7" corrigés dans > Ø 5'
  - Couverture du ciel maximale
  - 0.8 - 2.4 μm

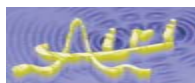


**EAGLE**

*Elt Adaptive optics for GaLaxy Evolution*

*F: LESIA, ONERA, GEPI, LAM*

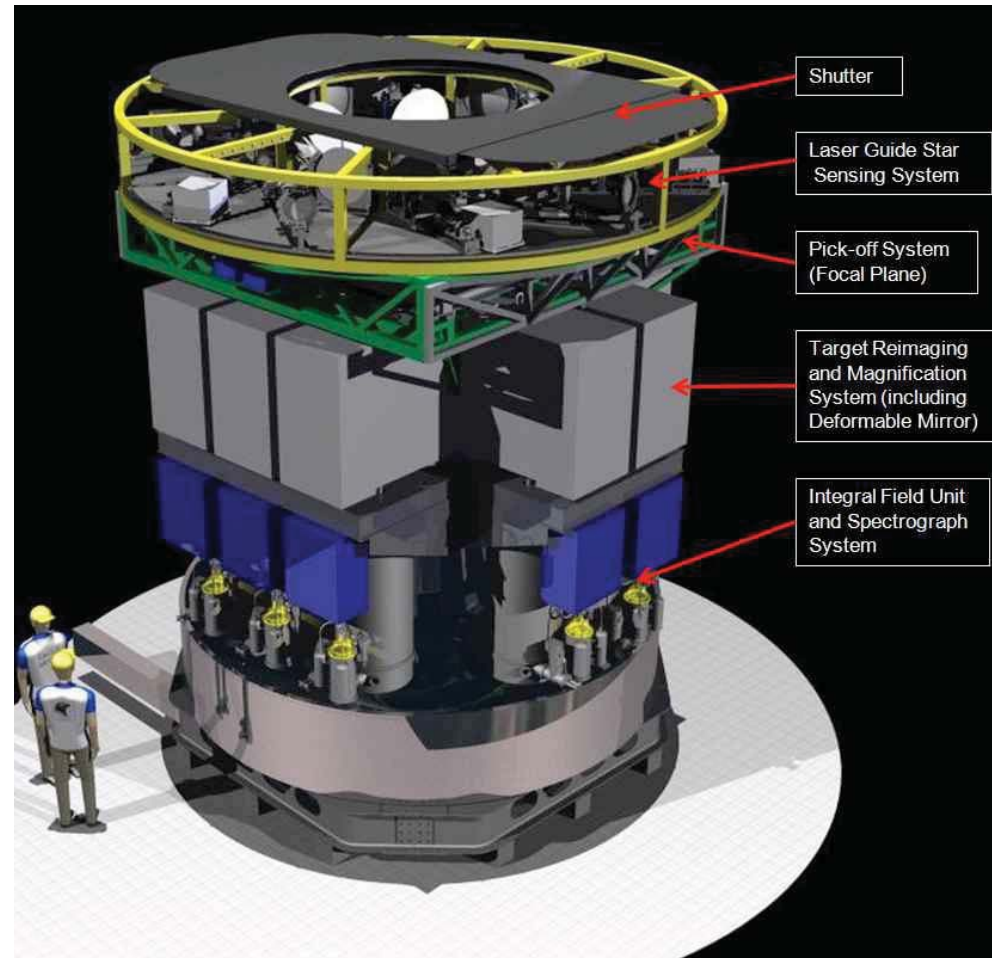
*UK: Univ. Durham, UK Ast. Tech. Center*



# Etude EAGLE / résultats

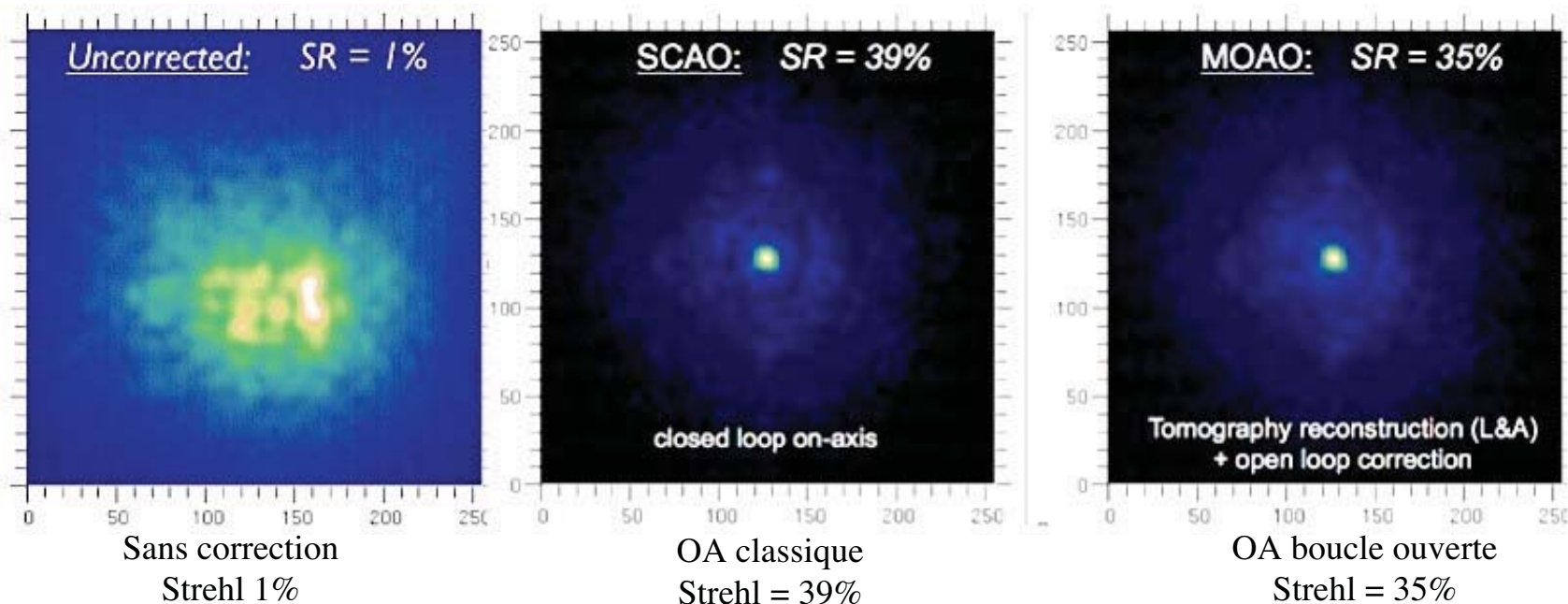
- 6 étoiles laser sur un cercle de  $\sim 7.5'$ 
  - en dehors du champ  $\varnothing 5'$
- +  $\sim 5$  étoiles naturelles dans  $\varnothing 7'$  ( $mR < 17$ )
- Couverture du ciel  $> 90\%$  @ lat. gal.  $60^\circ$
- $> 35\%$  énergie d'un point source dans  $75 \times 75 \text{ mas}^2$  pris dans un champ  $\varnothing 5'$

DM	closed-loop DM open loop DM	85x85 (M4/M5) 85x85 (backup 64x64)
LGS WFS	SH 84x84	
Number	6	
Power	10W – 400 ph/subap.	
Sampling freq	250 Hz	
Position	$\varnothing 7.5'$	
NGS WFS	SH 64x64	
number	$\leq 5$	
limiting magnitude	$mR < 17$	
NGS FoV	$< \varnothing 7.3'$	
RTC	Full tomography	
freq.	25 Hz - 250 Hz	



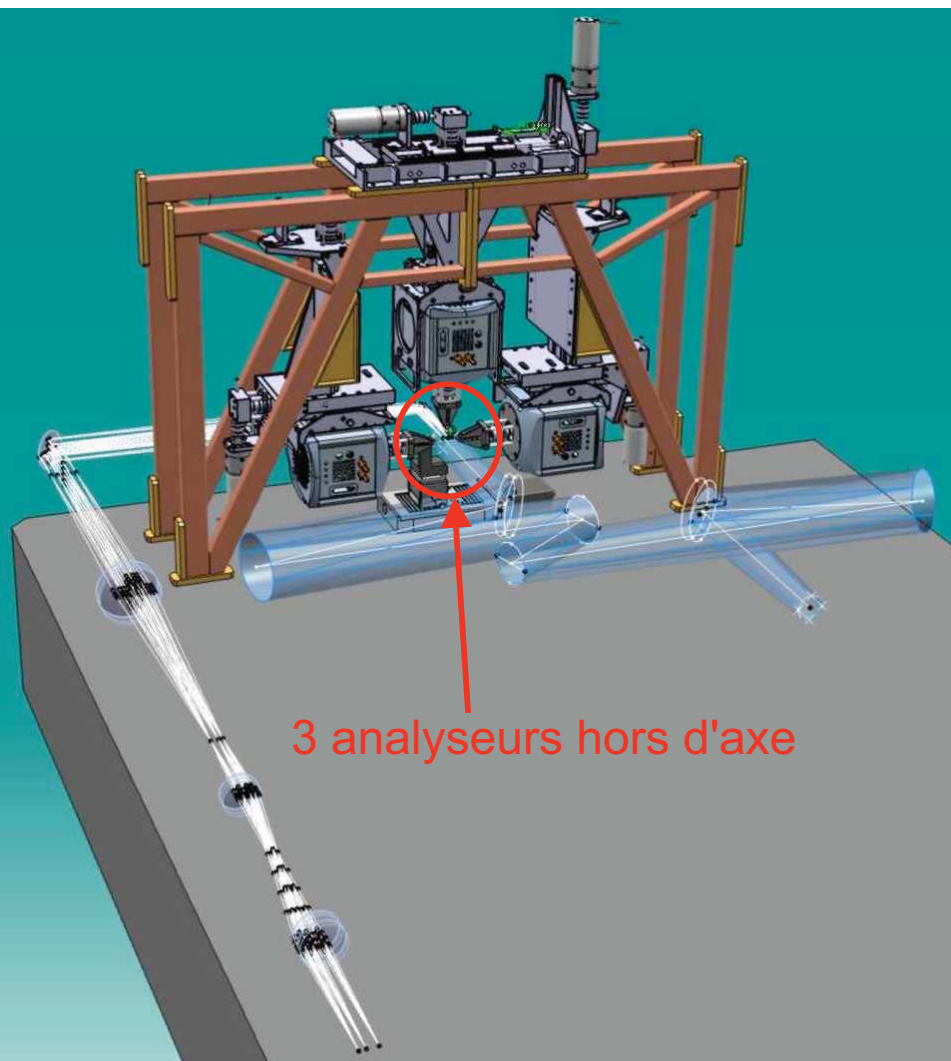
# Etude EAGLE / expérimentation sur SESAME

Banc SESAME (LESIA / ASHRA)

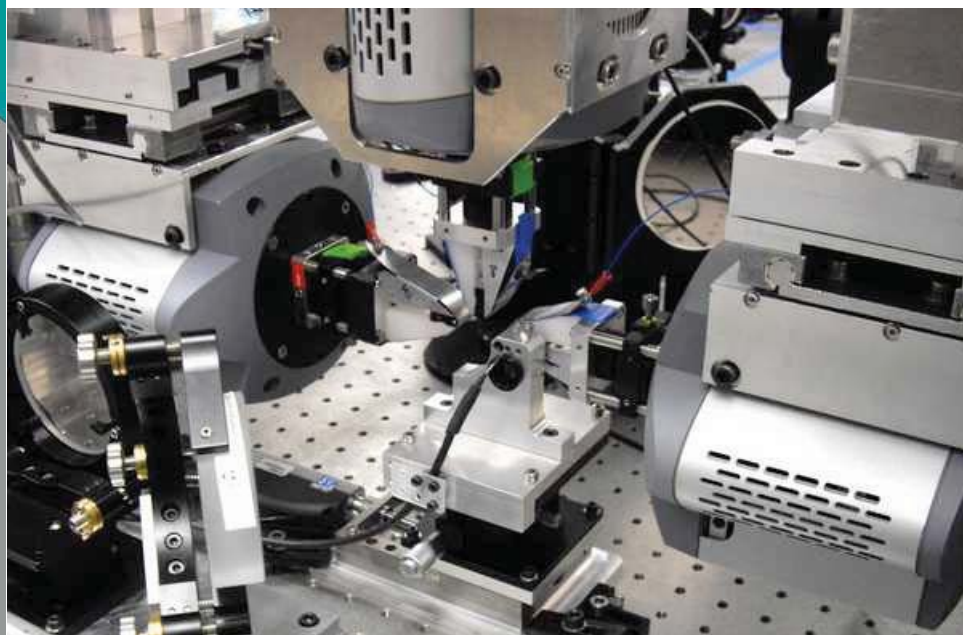


- Une seule couche turbulente simulée
- 3 analyseurs sur sources hors-d'axe
- Correction sur l'axe en boucle ouverte

# Etude EAGLE / expérience CANARY



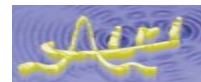
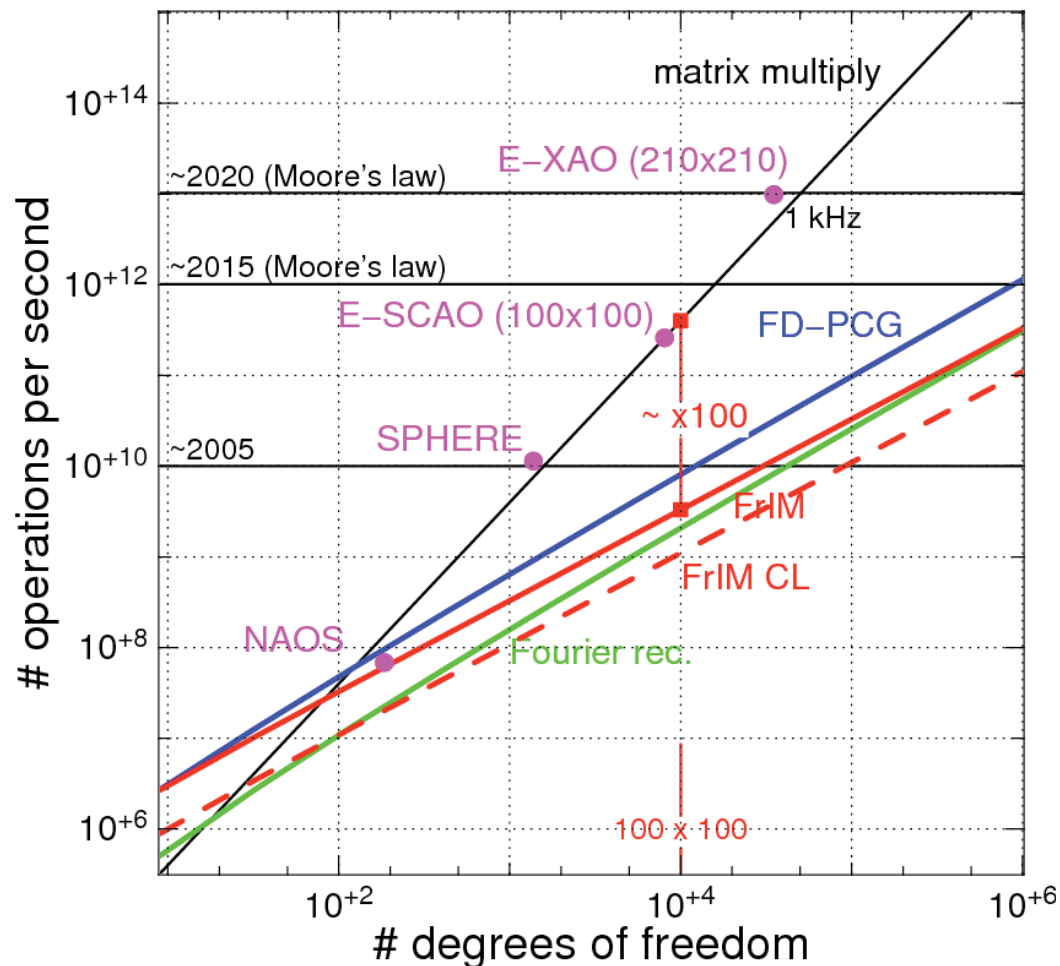
- Démonstration sur le ciel au 4.2m WHT (Canaries)
- MOAO sur une voie
- 3 phases
  - 2010: 3 étoiles naturelles + boucle ouverte
  - 2011: + 4 étoiles laser Rayleigh
  - 2012: + miroirs déf. woofer + high order





# Besoin de reconstruction rapide: FrIM

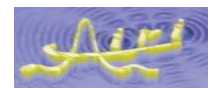
- Reconstruction
  - Mesures  $\sim$  gradients de surface d'onde
  - Il faut "reconstruire" les surfaces d'onde (ou les couches turbulentes) pour calculer la commande
- Equations à résoudre (linéaires):
  - $N = 10^4$  à  $10^5$  inconnues
  - $\sim 2 N$  mesures
  - $\sim 500$  à  $1000$  fois par seconde
- Avec matrice inverse
  - $\sim 2 N^2$  opérations/boucle
- FrIM: Fractal Iterative Method (CRAL)
  - $\sim 100 N$  opérations/boucle
  - Minimum de variance (= MAP ici)
- Calculateur temps réel:
  - Il faut aussi considérer la latence du calcul (en cours...)



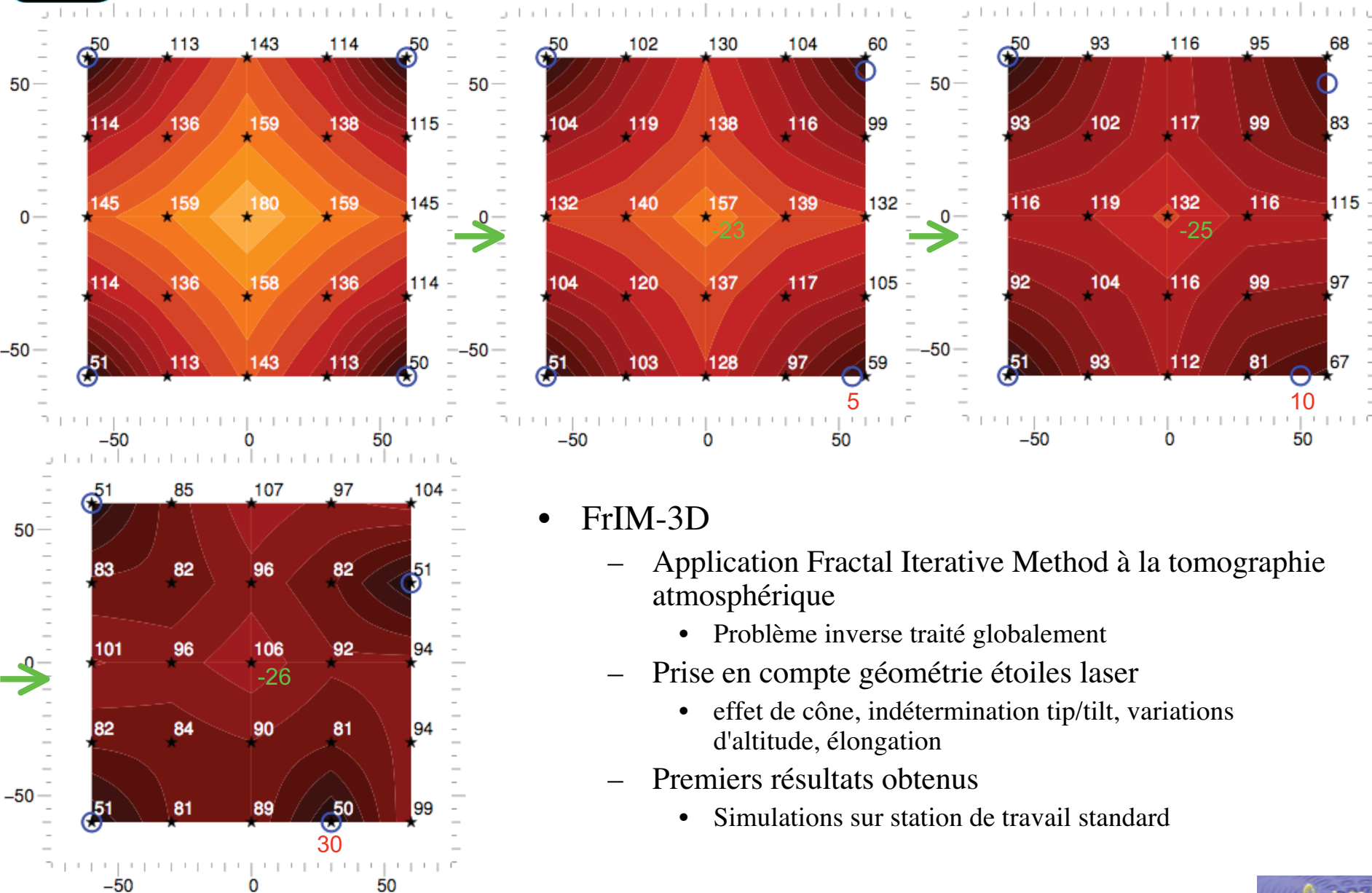


# Limites actuelles des codes de simulations

- Simulations actuelles basées sur code "de Fourier", rapide mais avec simplifications et approximations
  - télescope infini
  - faisceaux parallèles (effet de cône = erreur ajoutée aux autres erreurs)
  - ...
- Procédé actuel
  - calage du code "de Fourier" avec des codes end-to-end jusqu'à télescope de 21m
  - extrapolation à 42m avec code "de Fourier"
- => nécessité de développer des codes rapides pour l'E-ELT
  - CRAL: FrIM -> FrIM-3D (optimisation globale spatiale)
  - LAM + ONERA:
    - Approche basées sur les matrices creuses
    - "Kalman d'ensemble" (optimisation spatiale+dynamique)
      - Introduit il y a ~10 ans et utilisé en météorologie

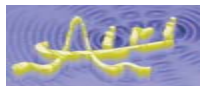


# FrIM-3D: évidence des modes "non-vus"

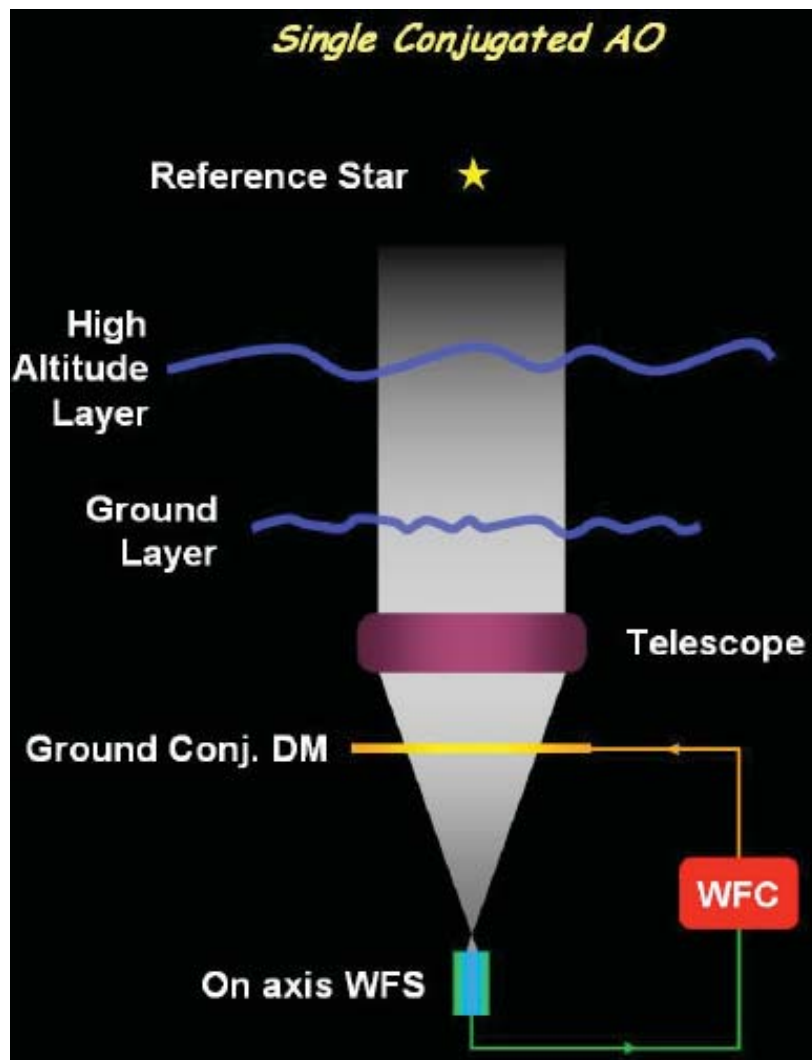


- FrIM-3D

- Application Fractal Iterative Method à la tomographie atmosphérique
  - Problème inverse traité globalement
- Prise en compte géométrie étoiles laser
  - effet de cône, indétermination tip/tilt, variations d'altitude, élongation
- Premiers résultats obtenus
  - Simulations sur station de travail standard



# Etude EPICS / objectifs



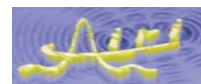
© E. Marchetti/ESO/2004

- XAO: Extreme Adaptive Optics
  - miroirs M4/M5 du télescope (85x85)
  - + miroir 210 x 210
- Objectifs (limités à l'OA ici)
  - 0.95 - 1.65  $\mu\text{m}$
  - Strehl > 90% en H
  - Minimiser le halo autour de l'image de l'étoile
    - <  $10^{-5}$  @ 20 mas [ $\lambda=1350\text{nm}$ ]
    - <  $10^{-6}$  @ 700 mas [ $\lambda=1350\text{nm}$ ]
- L'OA est complètement intégrée dans l'instrument
- Phase A encore en cours...



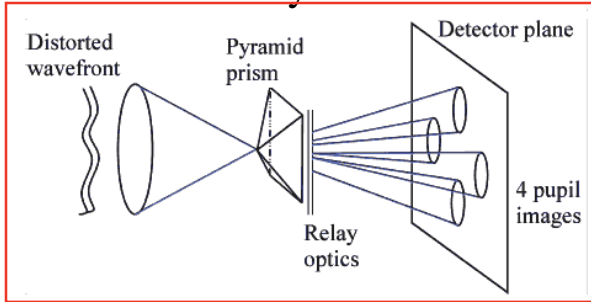
*Exo-Planet Imaging Camera and Spectrograph*

*ESO, LAOG, LESIA, FIZEAU, INAF-Padova, ASTRON, ETH Zürich, Univ. Oxford, LAM, NOVA*

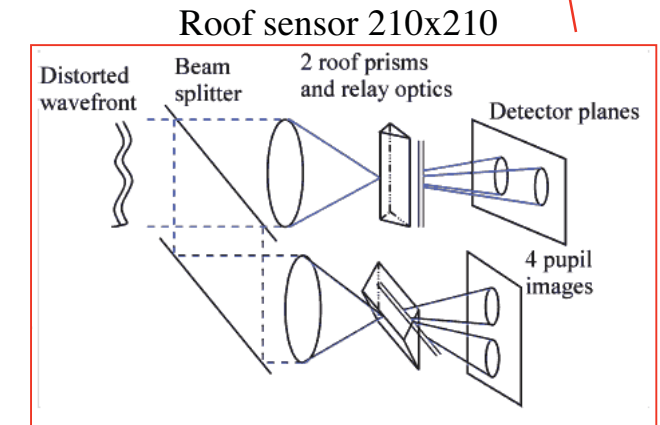
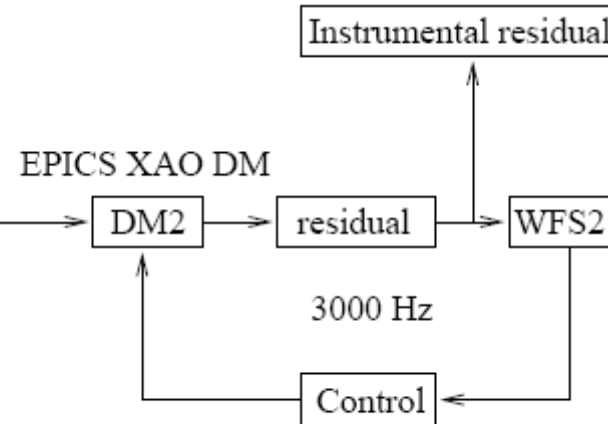
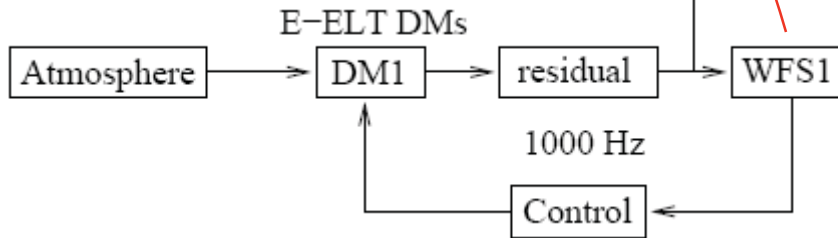


# Etude EAGLE / qqques tendances...

## Modulated Pyramid 84x84



$\Delta\lambda = 500-900\text{nm}$

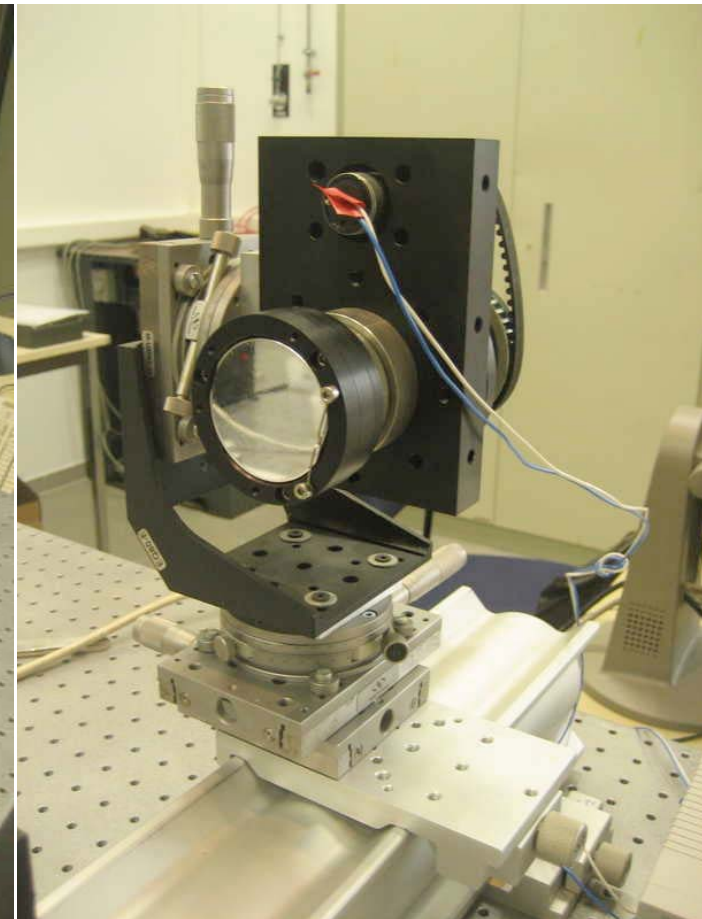
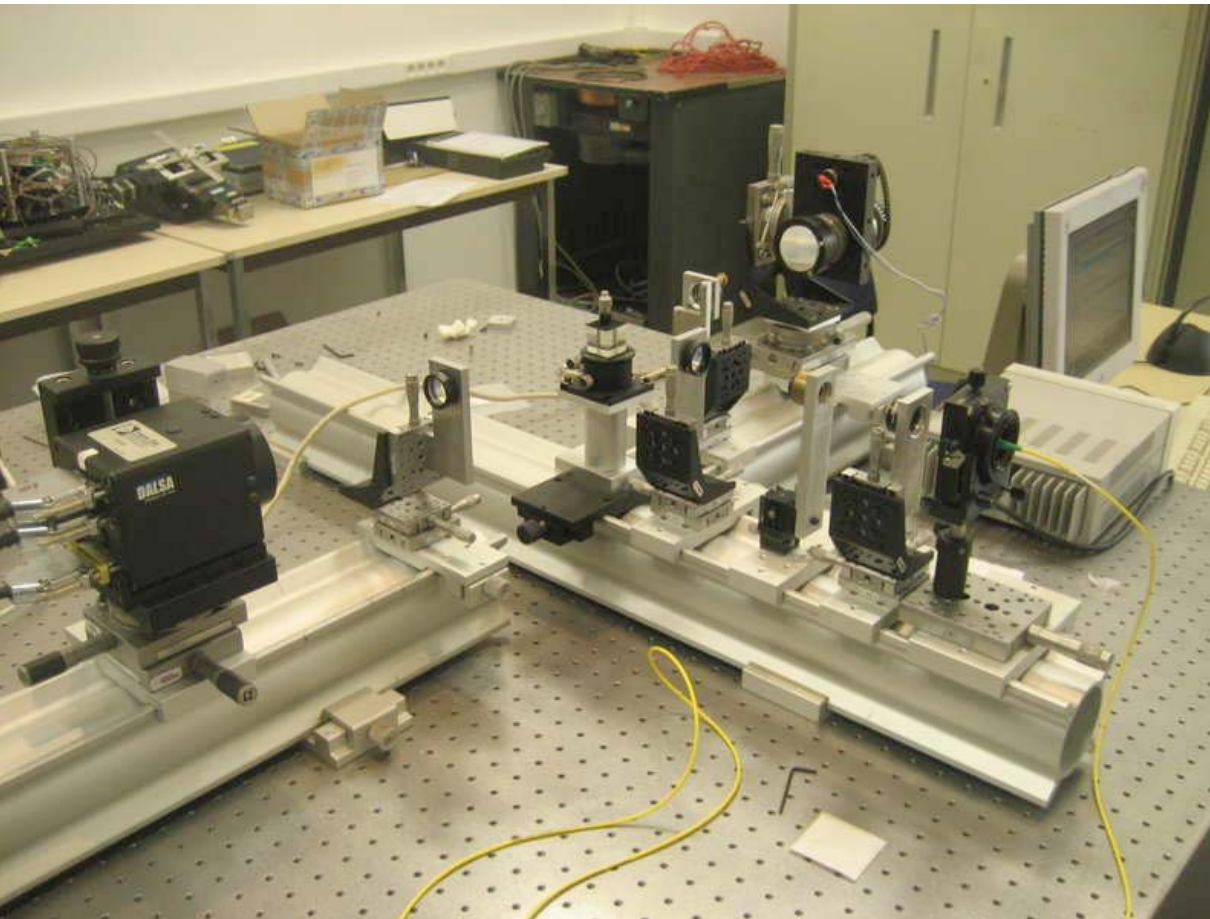


$\Delta\lambda = 700-900\text{nm}$

- Nouvel analyseur de surface d'onde
  - Minimisation de la propagation du bruit
    - => analyseurs **non-linéaires**
  - Difficulté avec les détecteurs actuels
  - A valider...
- Vitesse  $\sim 3\text{ kHz}$ 
  - Utilisation de nouvelles méthodes de contrôle indispensable
  - Calculateurs à développer
- Suppression des aberrations statiques
  - Mesures sur l'image finale (diversité de phase)

## LAM: Experimental R&D validations

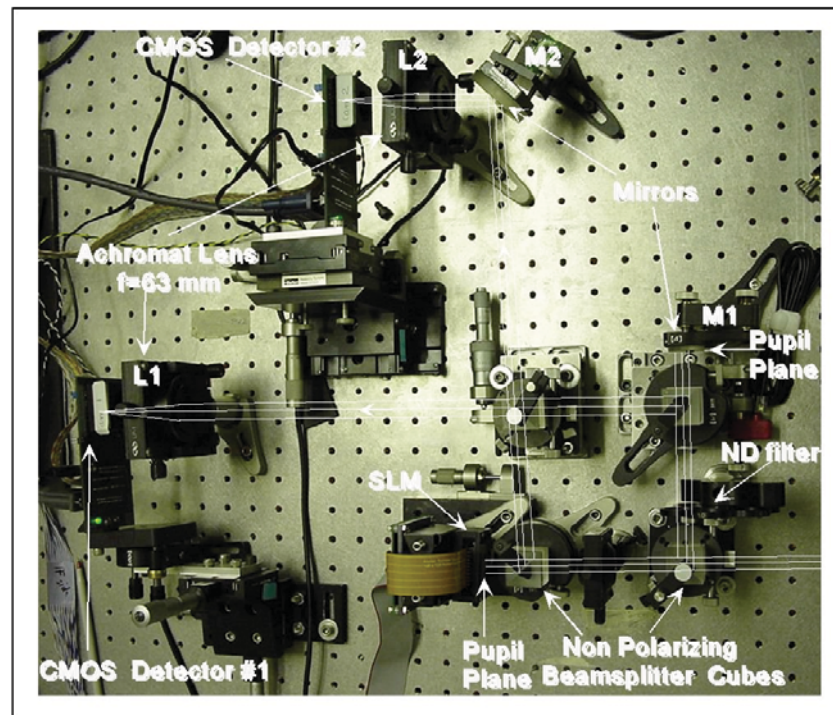
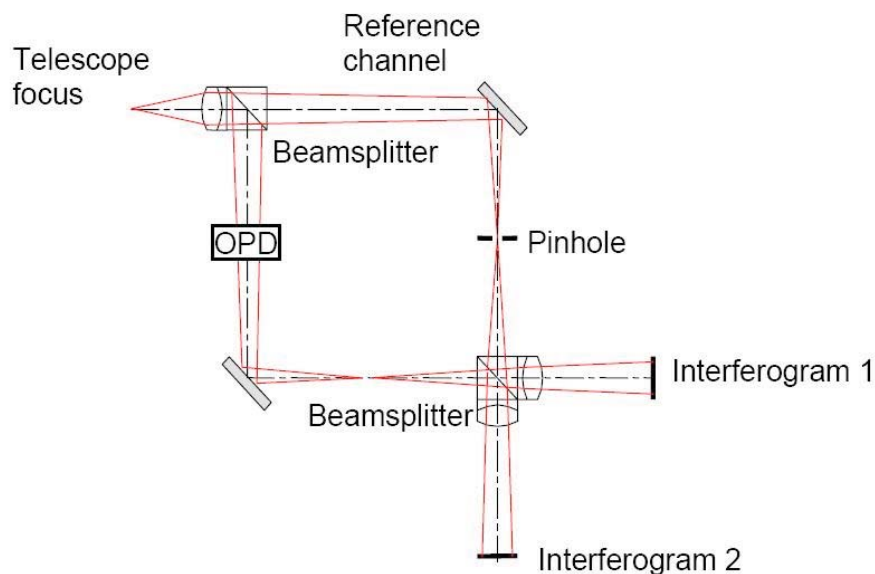
- Adaptive optics & coronagraphic bench being assembled
- Objectives : validate instrumental R&D
  - coronagraph optimisation and coupling with Adaptive Optics wave front sensing
  - woofer – tweeter based AO system study and optimisation





# CRAL: étude de l'analyseur Mach-Zehnder

- Pourquoi ?
  - Mach-Zehnder  $\Leftrightarrow$  propagation du bruit minimale
  - Mesure "creuse" (mesure très locale)
    - Reconstruction rapide ( $\sim$  mesure directe de phase)
- Mais problème inverse difficile
  - Mesure non-linéaire, chromatique, etc.



- Nouvelles architectures OA variées
  - contraintes par la gestion des faisceaux
- Manque d'expérimentation sur le ciel
  - Expérience CANARY critique
  - mesure d'analyse de surface d'onde sur étoiles laser ?
    - difficultés attendues: élongation, variation de densité du sodium, ...
- Besoin urgent de développer les logiciels de simulation pour 42m
- Besoin d'expérimentations au laboratoire
  - Plusieurs bancs existants ou en cours de montage
    - LESIA, ONERA, LAOG, LAM, CRAL, FIZEAU, ...

