

Les Optiques Adaptatives de l'European Extremely Large Telescope (E-ELT)

Gérard Rousset
(LESIA, Univ. Paris Diderot,
Observatoire de Paris)

Colloquium APC, Paris

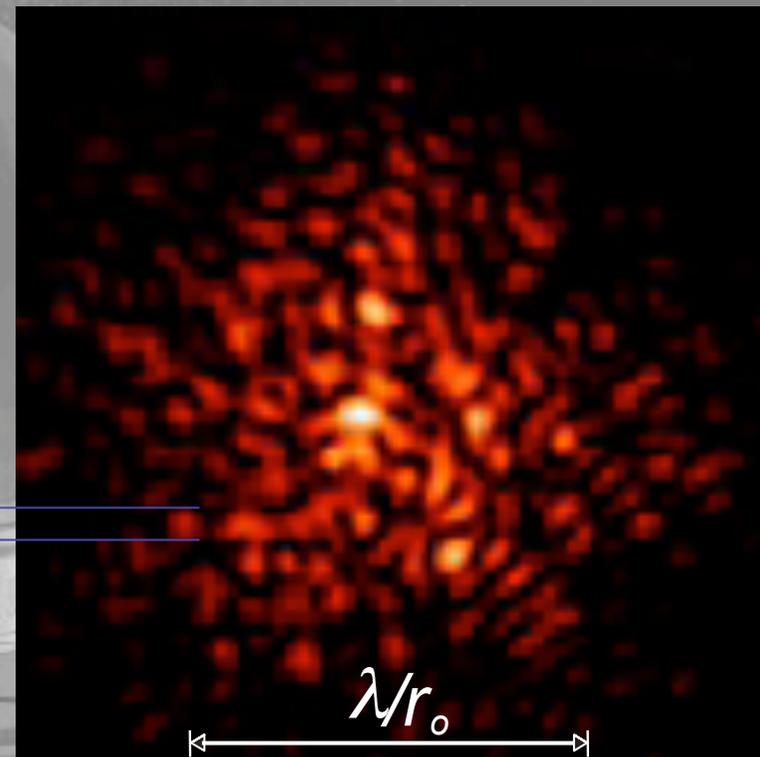
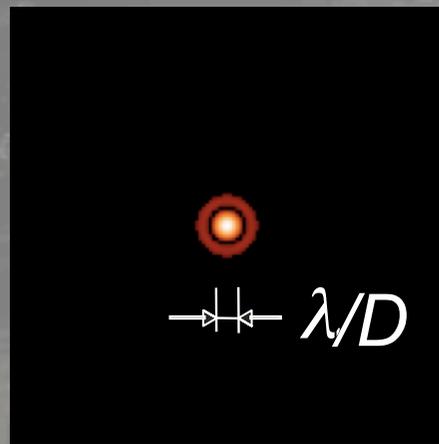
Plan

- Turbulence et optique adaptative
- Les ELT
- L'E-ELT
- Les optiques adaptatives de l'E-ELT
- Les instruments
- Conclusion

Dégradation des images par la turbulence atmosphérique

Image d'un point source :
limitée par la diffraction
(tache Airy)

dégradée par la turbulence
(tavelures / speckles)



Diffraction ($D=10\text{m}$) : $0,01''$ à $0,5\mu\text{m}$
Turbulence : $1''$ avec $r_0=10\text{cm}$ à $0,5\mu\text{m}$

Origine des dégradations

- Fluctuations de température de l'atmosphère => fluctuations d'indice (\sim achromatique)
- Avances et retards de phase sur le front d'onde

Fonction de structure d'indice :

$$\left\langle \left(n(\vec{r}) - n(\vec{r} - \vec{\rho}) \right)^2 \right\rangle = C_n^2(h) \rho^{2/3}$$

Phase sur le télescope :

$$\left\langle \left(\varphi(\vec{r}) - \varphi(\vec{r} - \vec{\rho}) \right)^2 \right\rangle \propto (\rho/r_o)^{5/3}$$

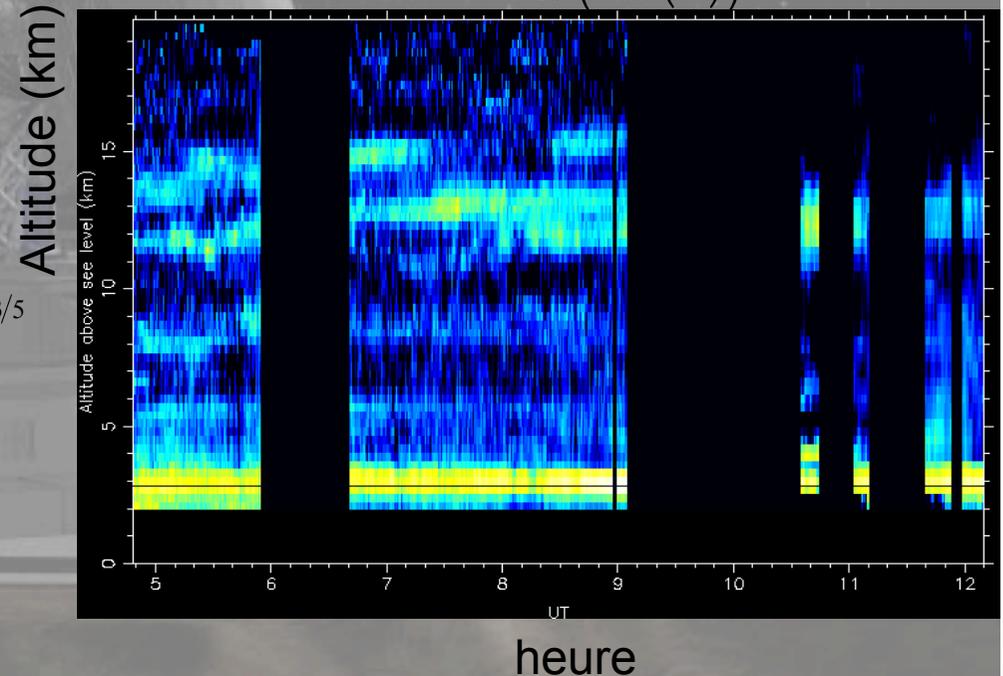
$$\text{Diamètre de Fried } r_o \propto \lambda^{6/5} \left(\int_0^{+\infty} C_n^2(h) dh \right)^{-3/5}$$

$$r_o \sim 10\text{cm à } 0,5\mu\text{m}, \sim 60\text{cm à } 2,2\mu\text{m}$$

Temps de corrélation :

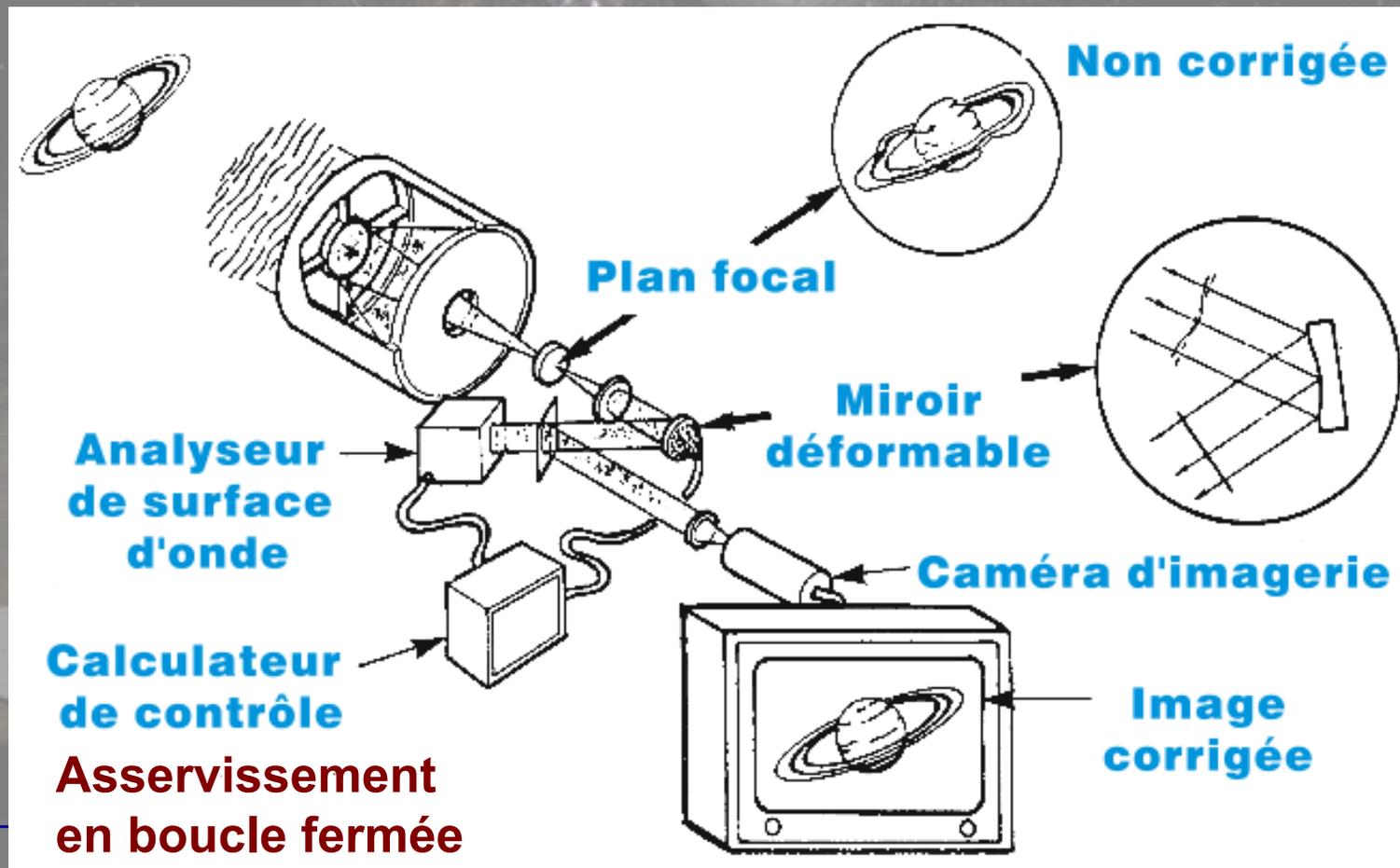
$$t_o \sim 3\text{ms à } 0,5\mu\text{m}, \sim 18\text{ms à } 2,2\mu\text{m}$$

$$\text{Log}_{10} \left(C_n^2(h) \right)$$



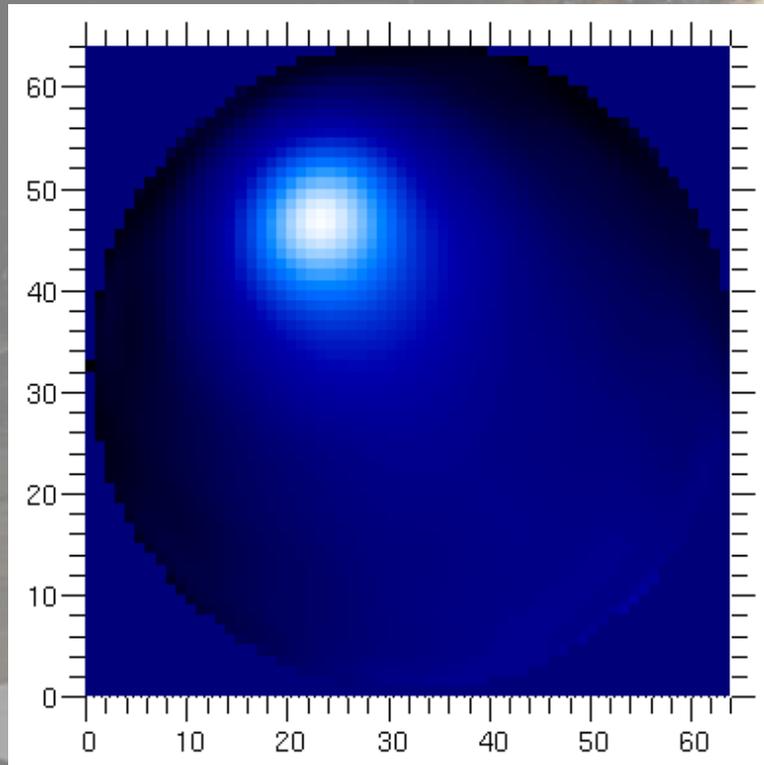
Principe de l'optique adaptative

Corriger avec un miroir déformable les avances et retards des fronts d'onde

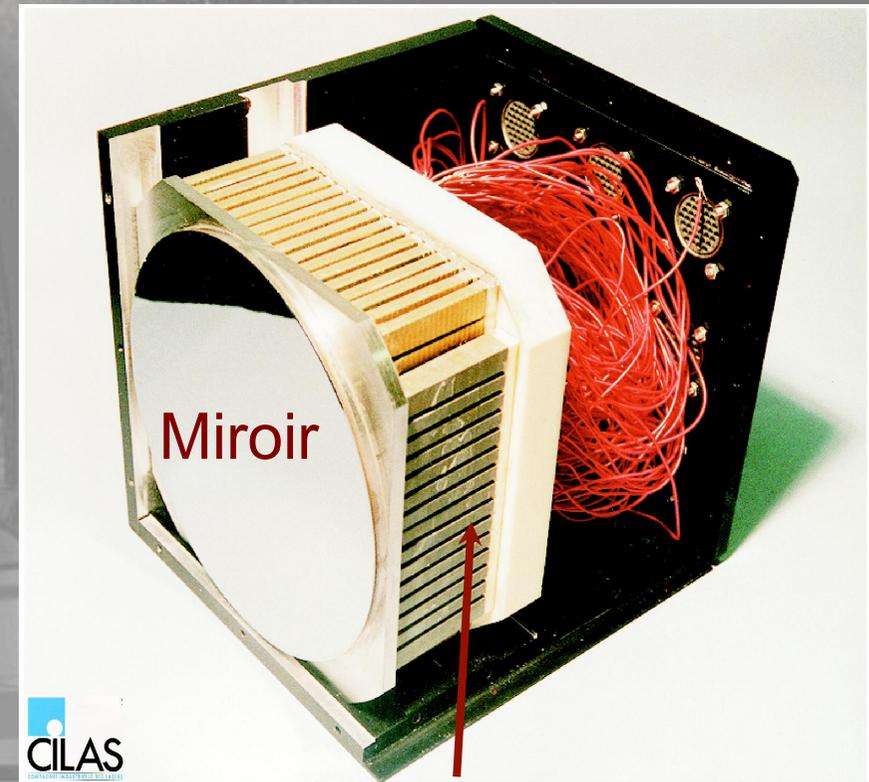


Miroir déformable

- Miroir conjugué de la pupille d'entrée du télescope
- Déformations ~ 1 à $5 \mu\text{m}$
- De ~ 50 à 700 actionneurs aujourd'hui ($\sim (D/r_o)^2$)
- Fréquence de commande $> 100 \text{ Hz}$



Déformée par un actionneur



Actionneurs piézoélectriques

Analyseur de front d'onde

Shack-Hartmann (SH) WFS

Rayons lumineux perpendiculaires au front d'onde

Front d'onde turbulent

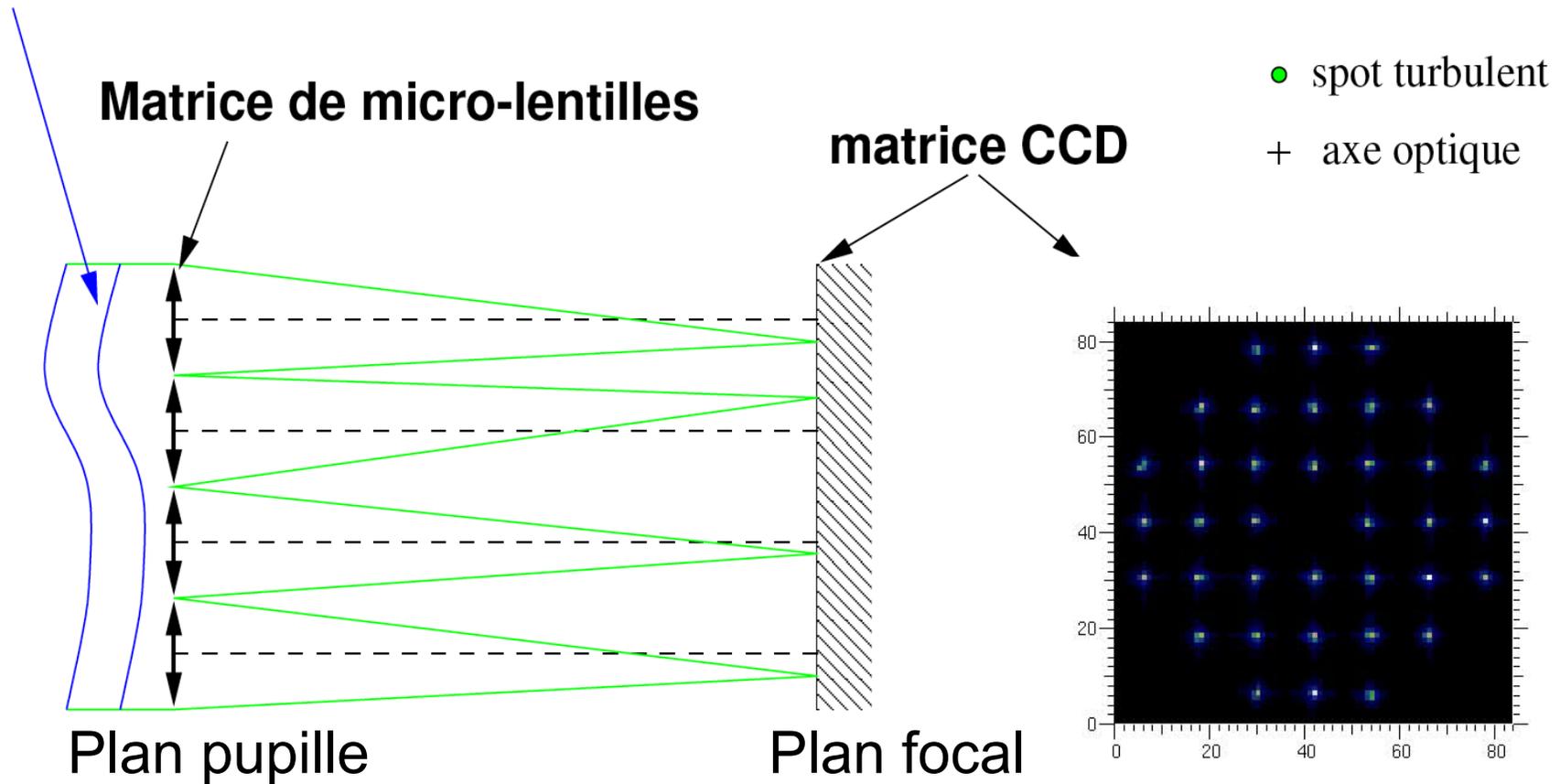


Image (PSF) longue pose

Gain en sensibilité et résolution spatiale

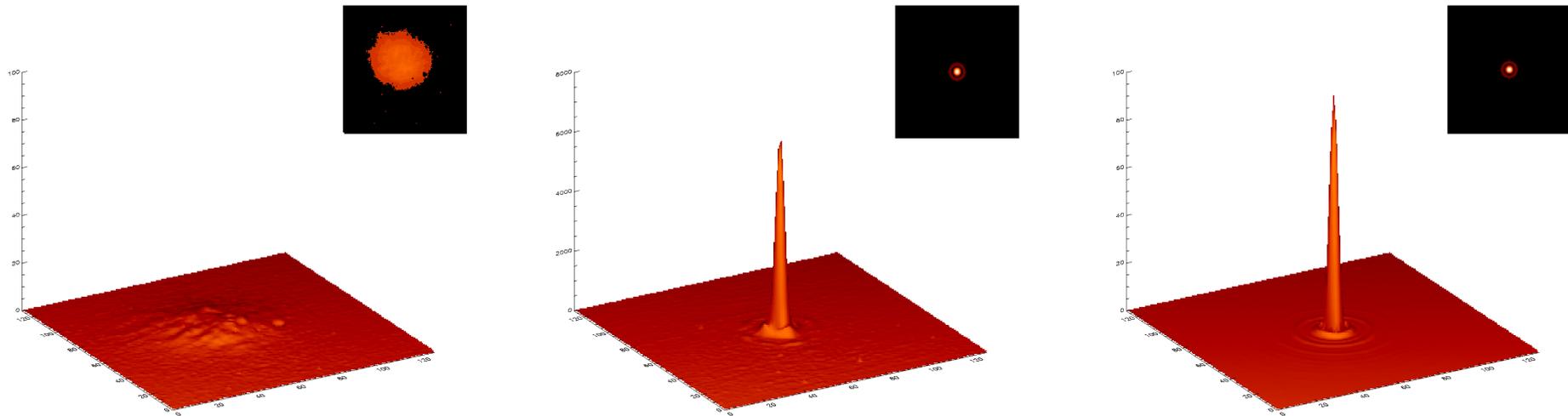


image turbulente

Erreur de front d'onde WFE=250nm

image corrigée ($SR = 64\%$)

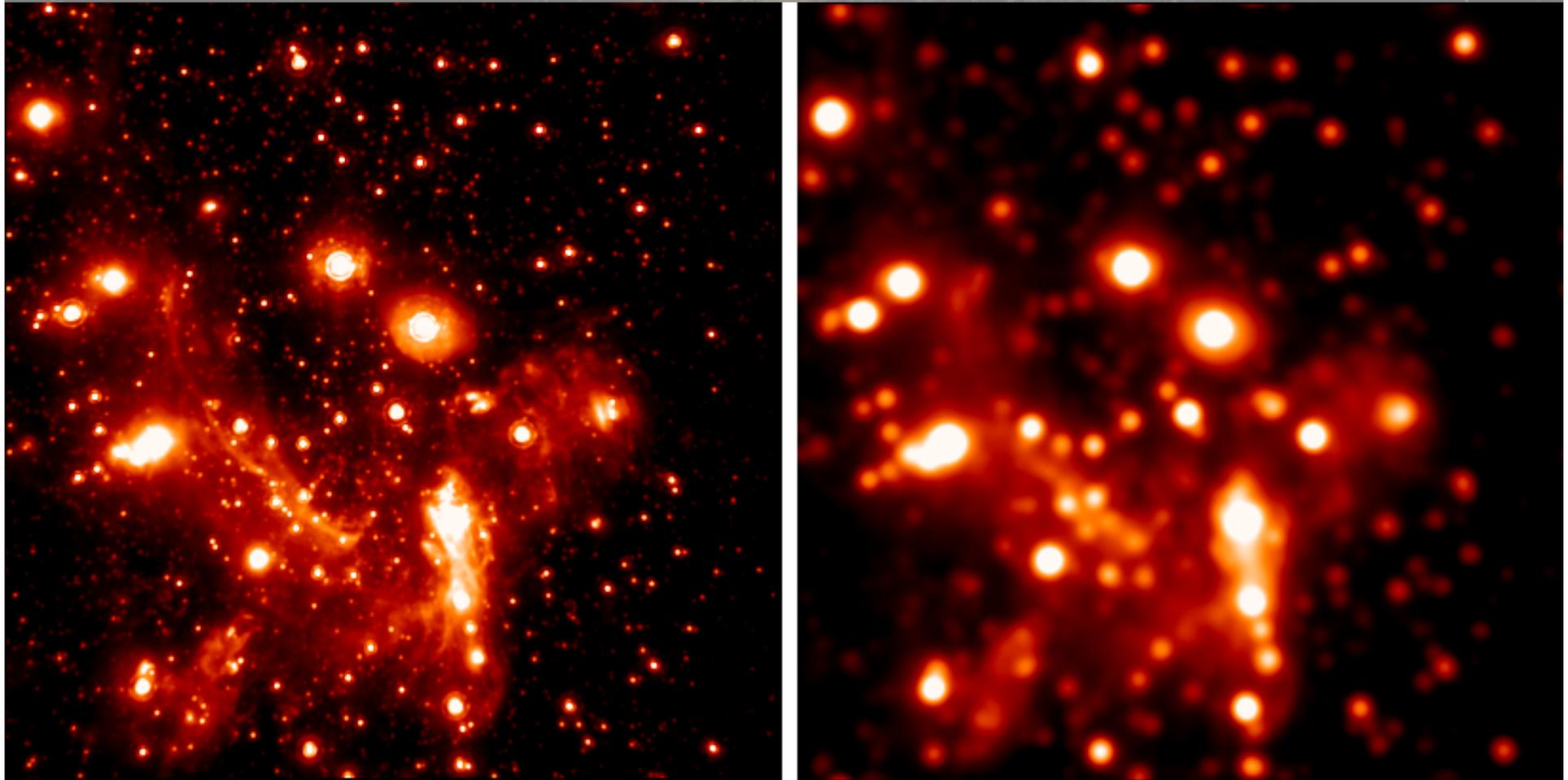
tâche d'Airy

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

Image du centre galactique

(Clénet et al. 2004)



Avec OA

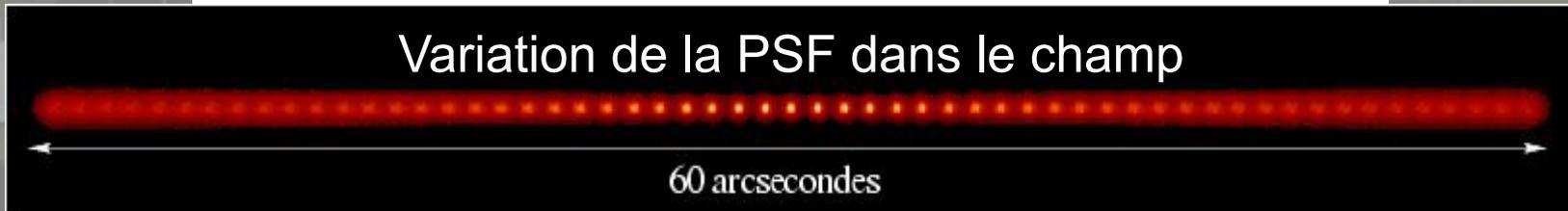
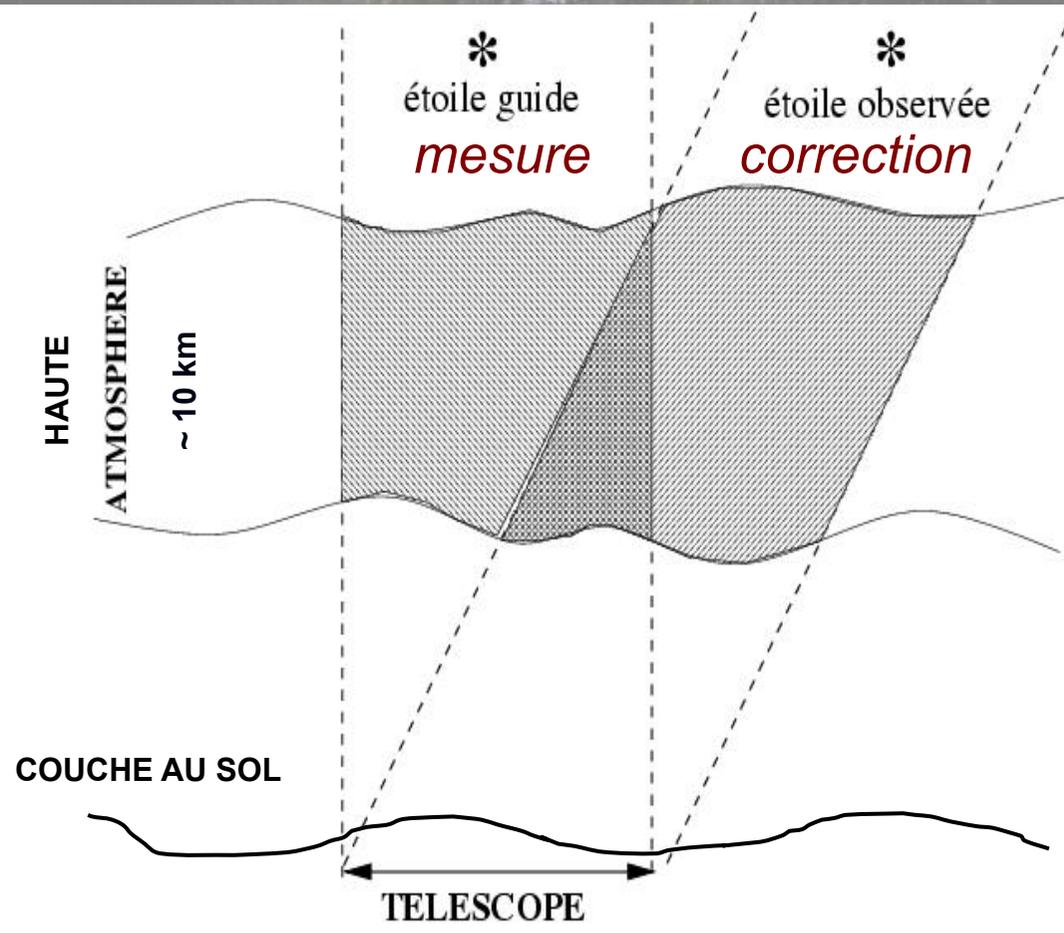
(à $3,4\mu\text{m}$, $20''$)

Sans OA

Limitation du champ de vue en OA

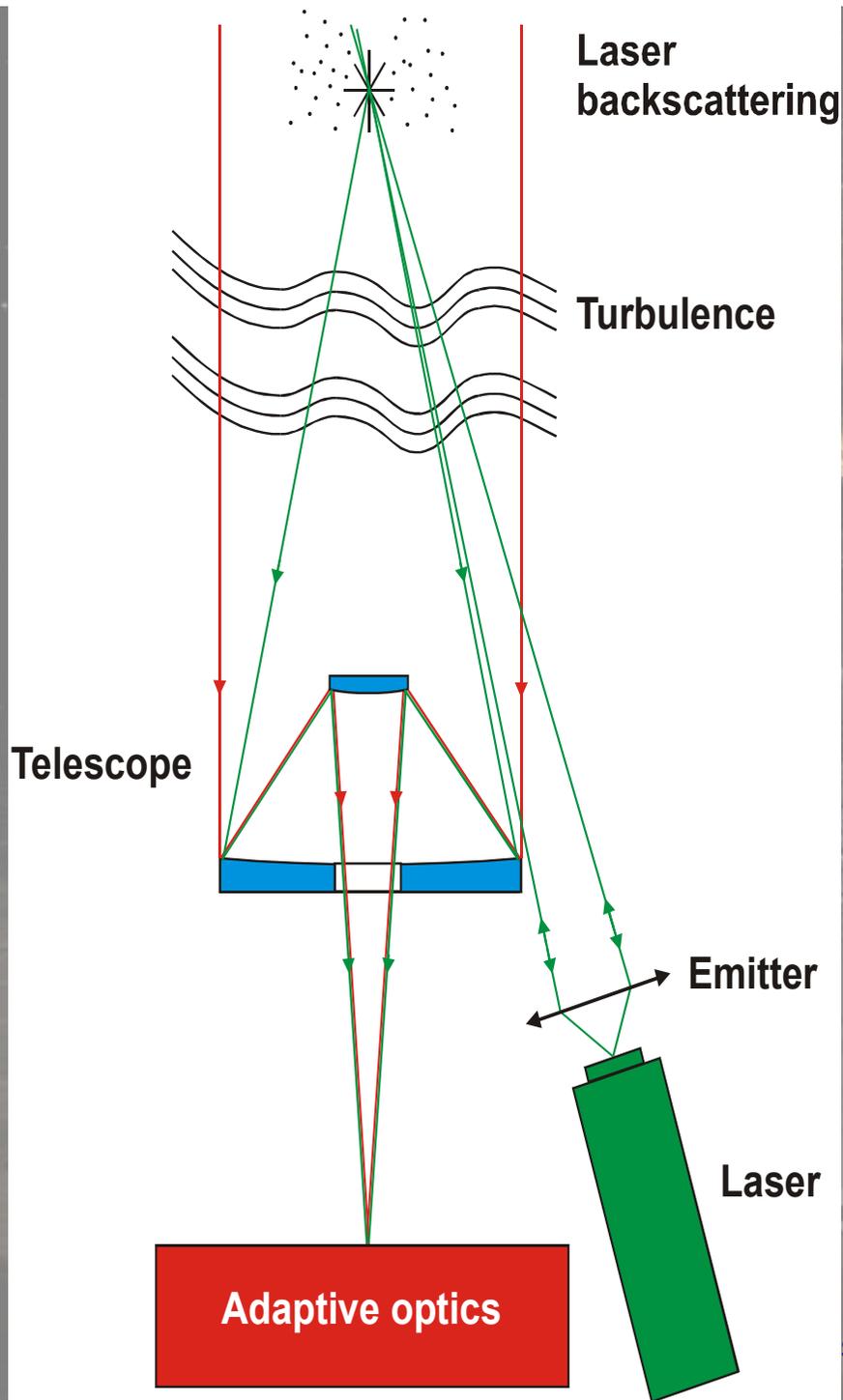
Faible corrélation
des fronts d'onde
en altitude

Forte corrélation
au sol



Luminosité des étoiles guides

- Mesure du front d'onde : ~ 200 photons détectés par sous pupille (CCD très sensible)
- \Rightarrow Une étoile guide de magnitude $V \sim 10$
- Les objets souvent beaucoup plus faibles !!!
- Très peu d'étoiles guides «naturelles» (NGS) proches (qq 10 arcsec) et assez brillantes
- Couverture du ciel très faible
- \Rightarrow Etoile artificielle créée par laser (LGS)



Etoile guide laser (LGS)

Rétrodiffusion sur la couche mésosphérique de Sodium à ~90 km d'altitude, mais :

- angle d'arrivée non mesurable => une NGS
- effet de cône...
- source 3D fluctuante...



Plan

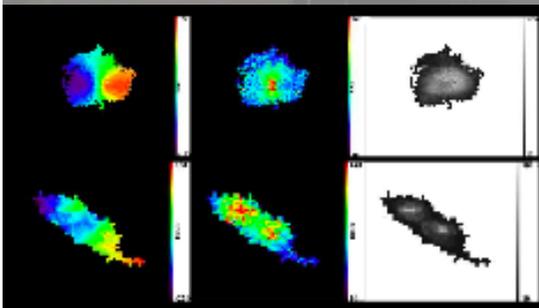
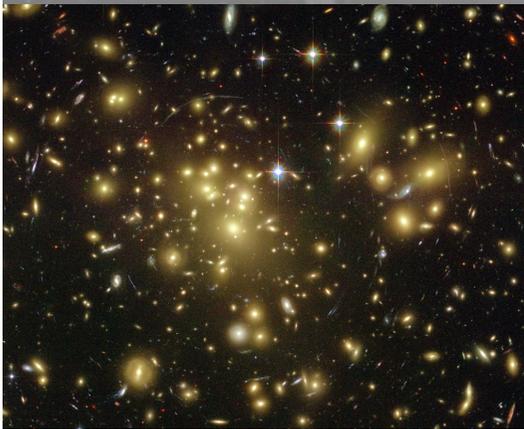
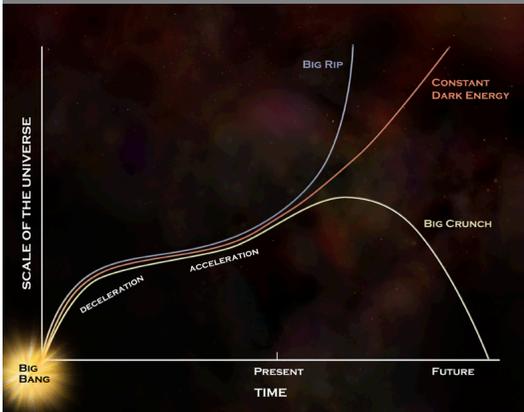
- Turbulence et optique adaptative
- **Les ELT**
- L'E-ELT
- Les optiques adaptatives de l'E-ELT
- Les instruments
- Conclusion

Pourquoi des télescopes géants de 30m de diamètre ?

Dans les domaines visible et IR

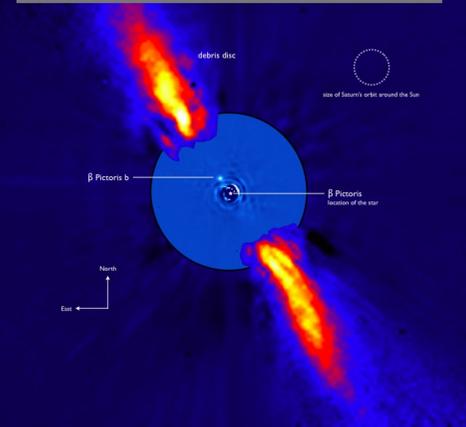
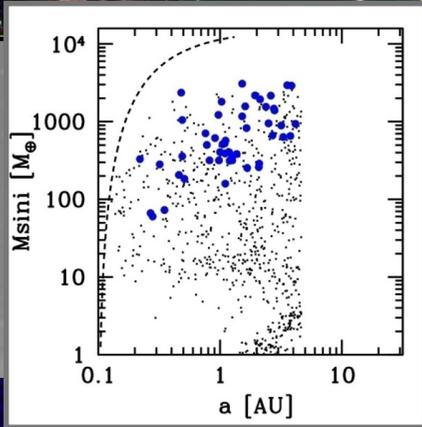
- Ouvrir de nouvelles fenêtres en astrophysique (priorités d'Astronet, de l'INSU)
- Complémentarité Alma, JWST, LSST, SKA
- Par rapport aux 8 - 10 m
 - Surface collectrice x 10 à 25
 - Résolution angulaire x 3 à 5
 - Gain ~ 100 en sensibilité
 - Gain ~ 1000 en contraste
- Maturité des télescopes actifs et de ***l'optique adaptative***

Quelle astrophysique ? (1/2)



- Variation des constantes physiques, accélération de l'expansion : spectroscopie ultra stable à très haute résolution spectrale
- Premières étoiles, premières galaxies, formation et évolution des galaxies : grand champ, sensibilité, résolution spatiale et spectroscopie
- Spectroscopie du milieu intergalactique
- Populations stellaires des galaxies : résoudre les étoiles à 20Mpc, sensibilité
- trous noirs supermassifs et formation des galaxies, les AGN : spectroscopie et résolution spatiale (1pc à 100Mpc)

Quelle astrophysique ? (2/2)



- Le centre galactique, horizon du trou noir : test de la relativité, astrométrie
- Trous noirs de masse intermédiaire
- Formation des étoiles et des systèmes planétaire (qq 10 AU à qq 1000pc), datation, naines brunes, binaires ultra-froides : sensibilité, résolution spatiale
- Détection, imagerie et caractérisation des exoplanètes, planètes rocheuses, zone habitable, disques protoplanétaires internes (1AU à 100pc) : très haute résolution spectrale et stabilité, très haut contraste 10^{-9} à 0.1 arcsec

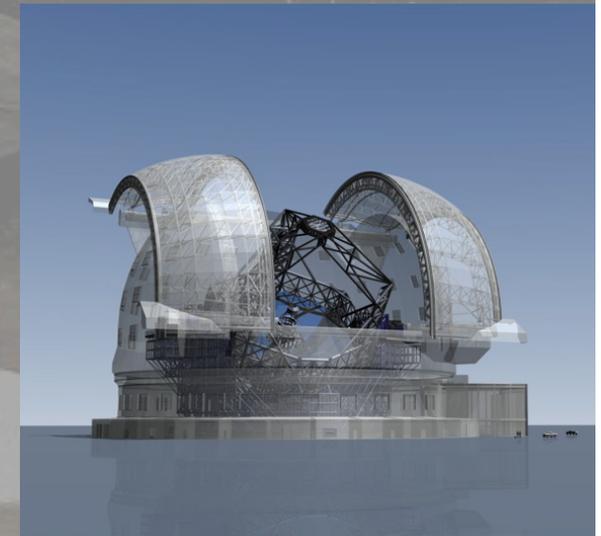
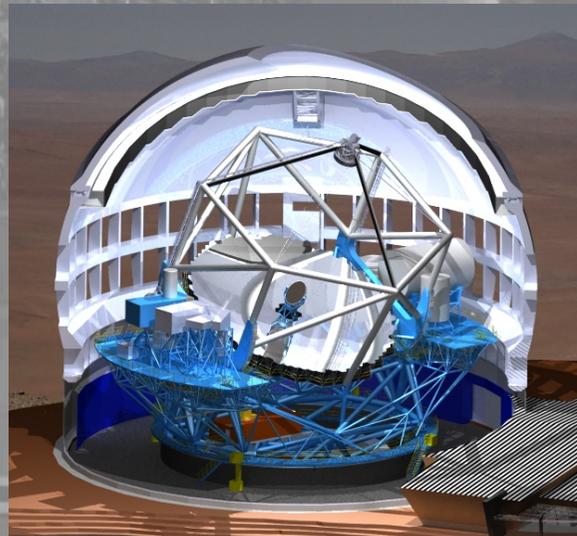
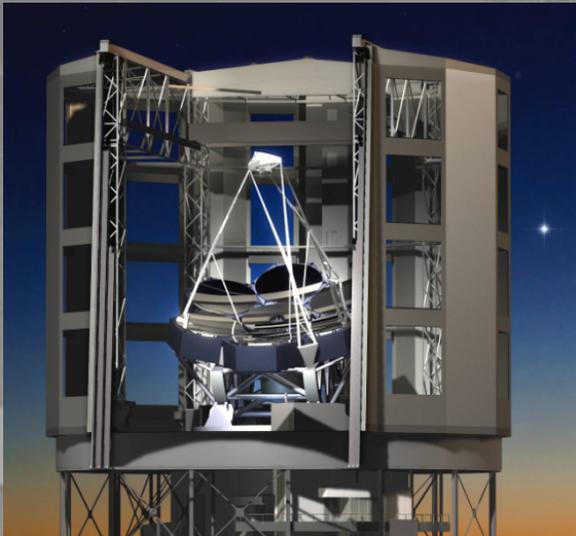
Quels projets ?

- Horizon 2020-25
- Deux menés aux USA et un en Europe :

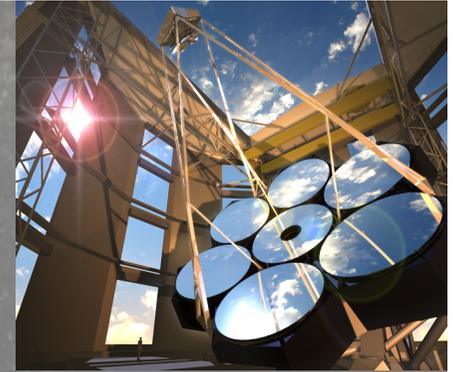
Giant Magellan Tel.
GMT, 25m, Chili

Thirty Meter Tel.
TMT, 30m, Hawaii

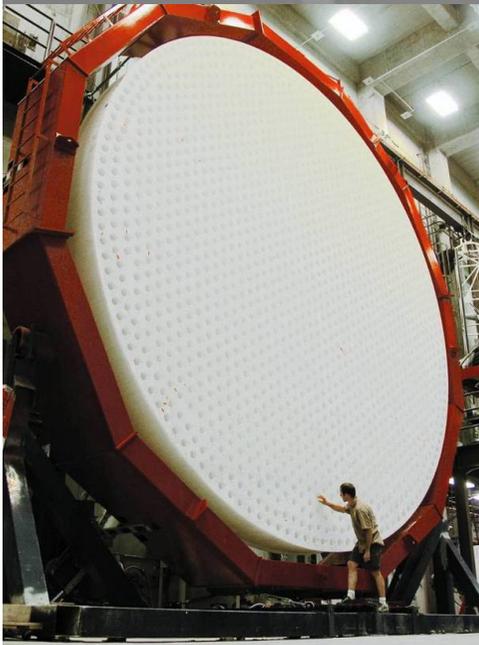
European Extremely
Large Telescope
E-ELT, 39m, Chili

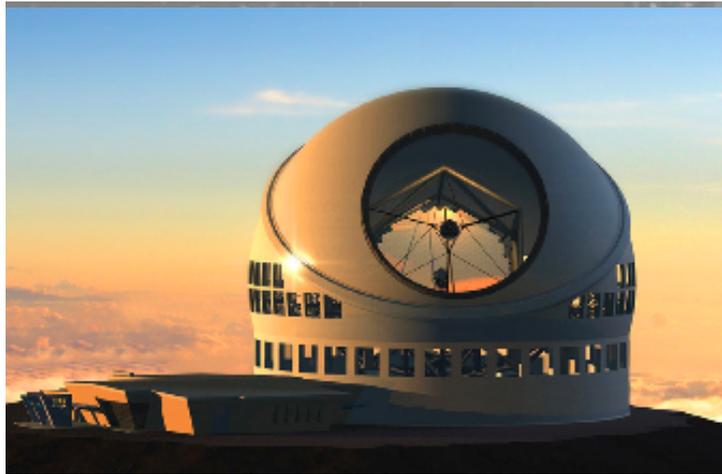
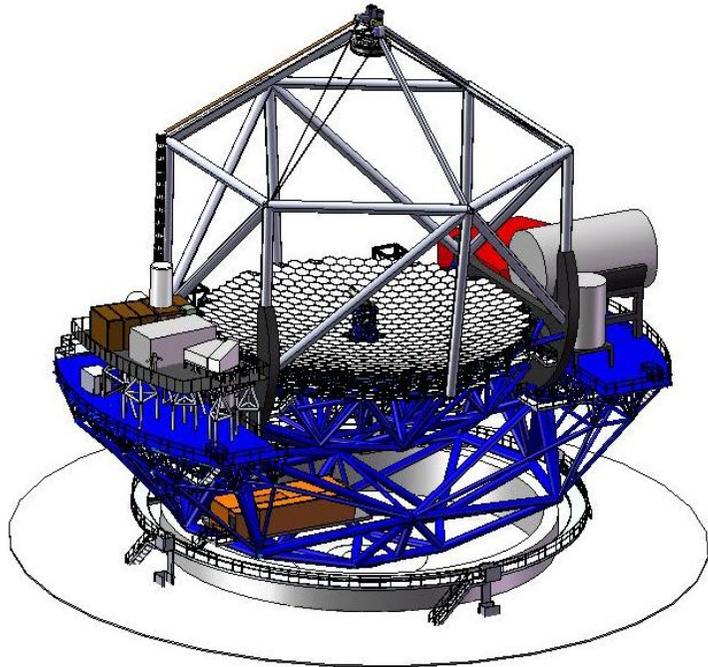


GMT (25m)

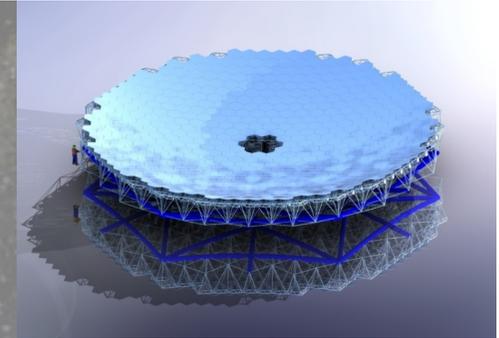


- Universités US (Arizona, Harward, Smithsonian, Texas, Carnegie)...
- Las Campanas, Chili
- Grégorien, un foyer f/8
- M1 : 7 segments de 8,4m off axis à cophaser
- 380 m², résolution 9mas @ 1 μ m
- M2 : 7 segments de 1,06 m rigides (tip-tilt) ou adaptatifs (4700 action.)
- Champ maximum 20', IR moyen
- Coût : ~ 1,1 G\$





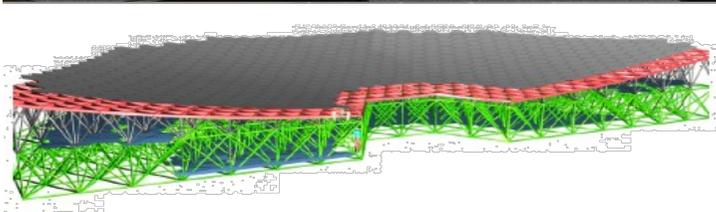
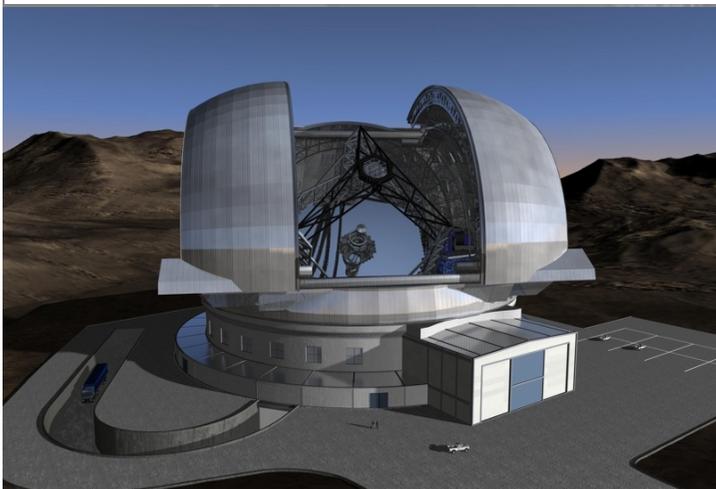
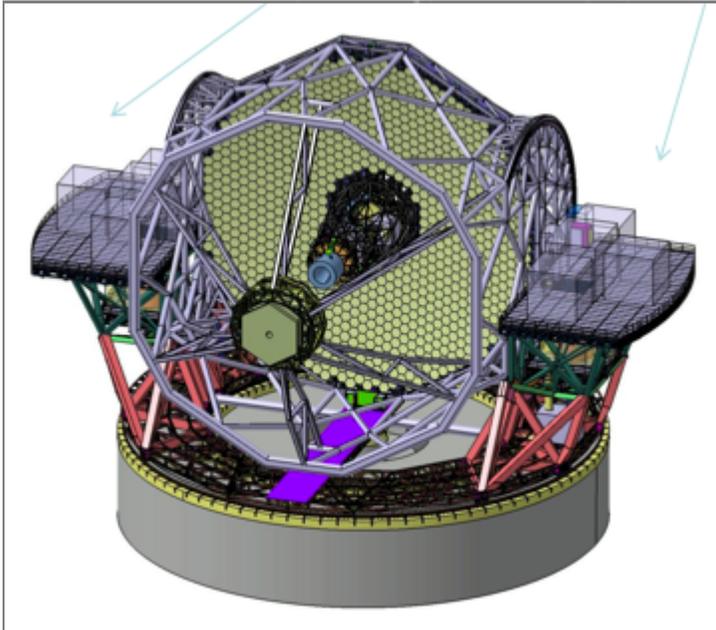
TMT (30 m)



- Université de Californie, Caltech, Canada, Japon (Chine ?)...
- Mauna Kea, Hawaii
- Ritchey Chrétien, f/15 Nasmyth
- M1 : 492 segments hexagonaux de 1,44 m à cophaser
- 700 m², résolution 7 mas @ 1 μ m
- M2 : 3,1m rigide
- Champ maximum 20'
- Coût : 1,4 G\$

Plan

- Turbulence et optique adaptative
- Les ELT
- **L'E-ELT**
- Les optiques adaptatives de l'E-ELT
- Les instruments
- Conclusion



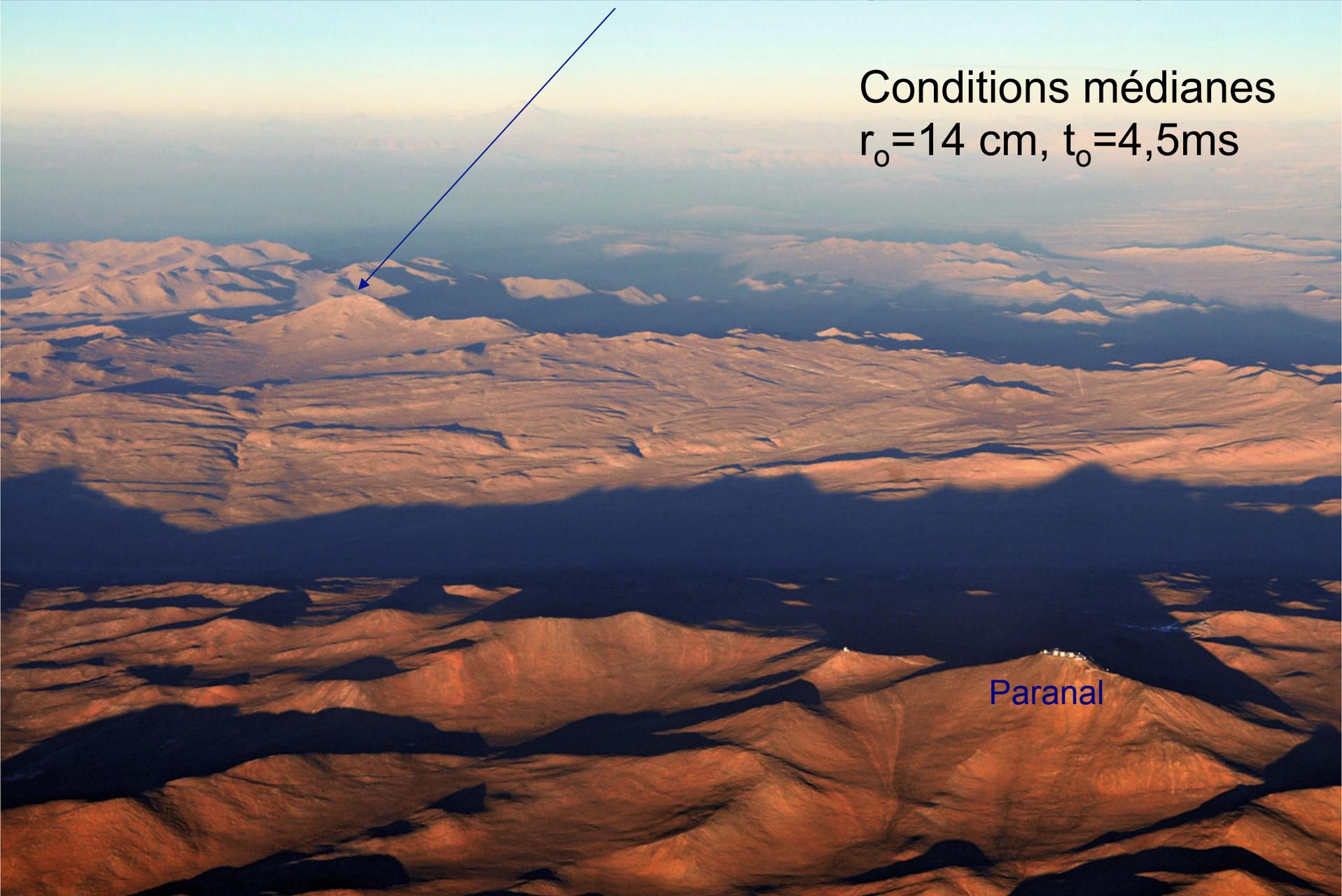
E-ELT (39m)

- European Southern Observatory
- Cerro Armazones, Chili
- Design à 5 miroirs
- Foyers Nasmyth f/18 et coudé
- M1 : 798 segments hexagonaux de 1,45m à cophaser
- 1100 m², résolution 5 mas @ 1 μ m
- Champ maximum 10'
- Coût ~ 1,1 G€

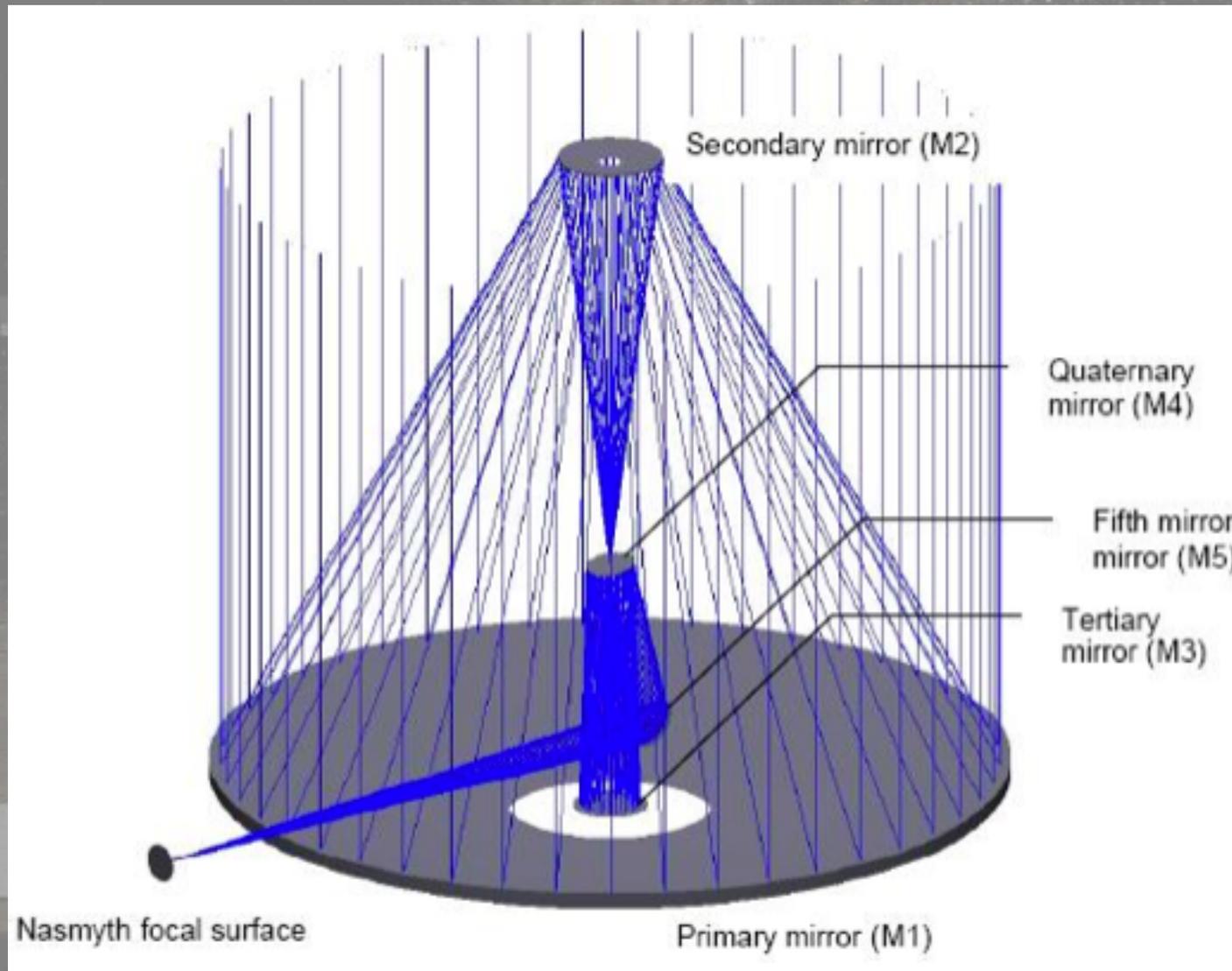
Cerro Armazones (3064m)

Conditions médianes
 $r_o=14$ cm, $t_o=4,5$ ms

Paranal

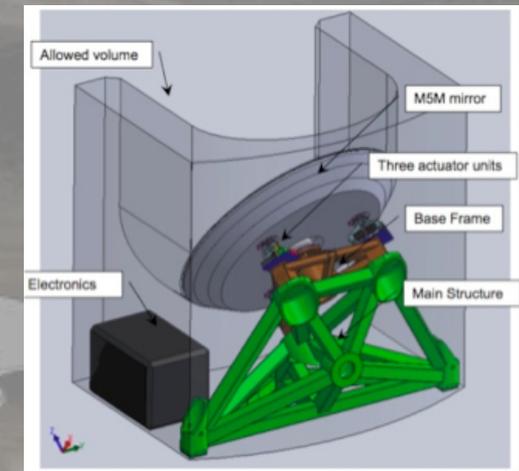
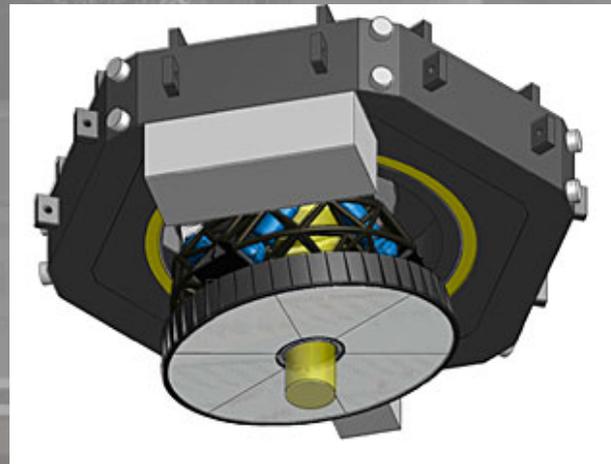
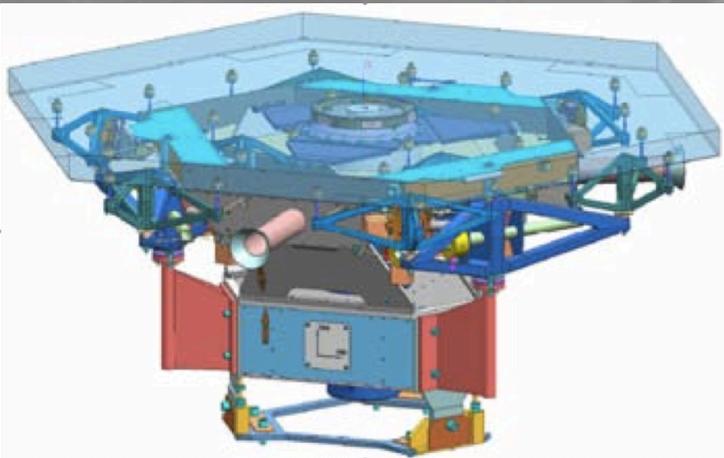
An aerial photograph of the Atacama Desert mountains. The terrain is rugged and brownish-orange, with deep shadows and bright highlights. A blue arrow points from the title 'Cerro Armazones (3064m)' to a specific peak in the distance. In the foreground, another peak is labeled 'Paranal' in blue text. The sky is a clear, pale blue.

Concept optique de l'E-ELT



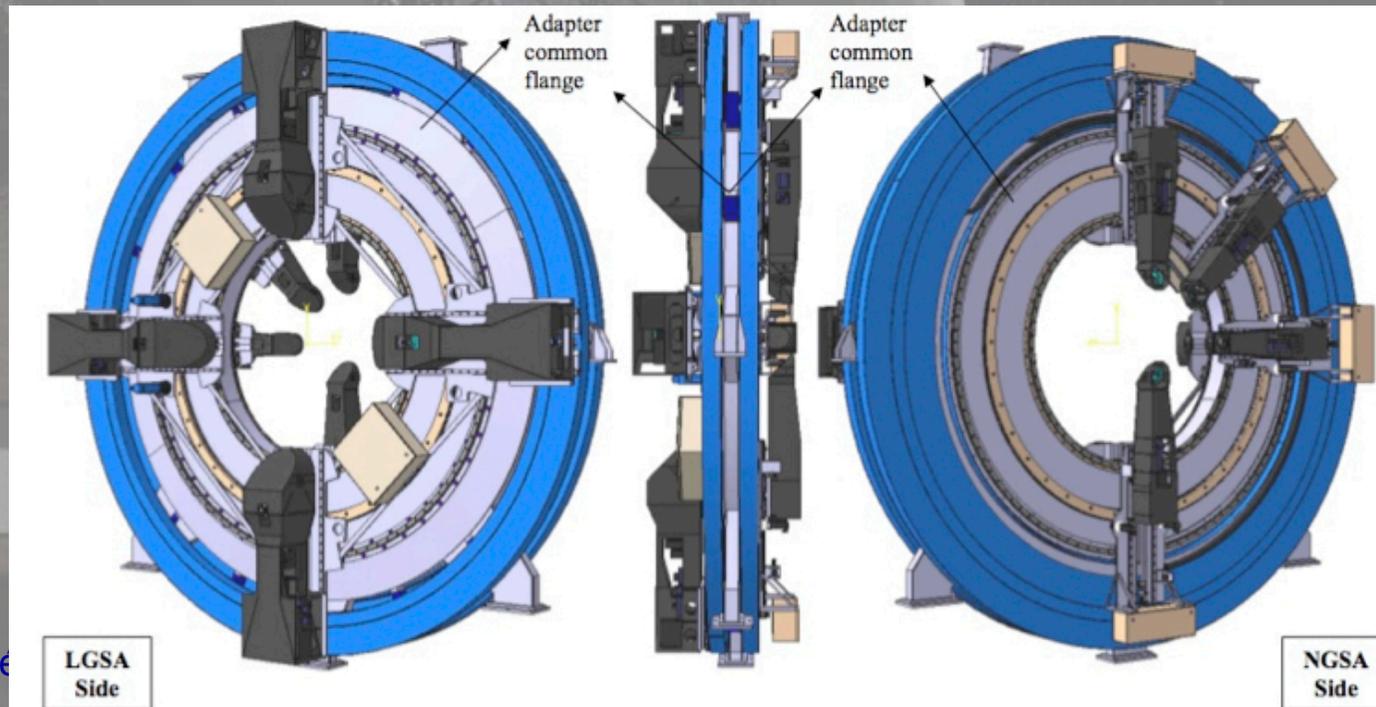
E-ELT : télescope adaptatif

- M1 : 39m, 798 segments (piston et tip-tilt), hexagone de 1,45m, épaisseur 50mm
- M2 : 4m, actif à 84 action.,
- M3 : 3,75m, actif à 57 action.
- M4 : plan 2,5m, adaptatif 5230 action., 6 pétales
- M5 : plan 2,7 x 2,2m, support actif tip-tilt



E-ELT : télescope adaptatif

- 1 NGS de cophasage de M1 + capteurs de bord
- 3 NGS WFS pour l'optique active de M2 et M3
- Turbulence et wind shake corrigés par M4 et M5, nécessite de 4 à 6 LGS WFS



Plan

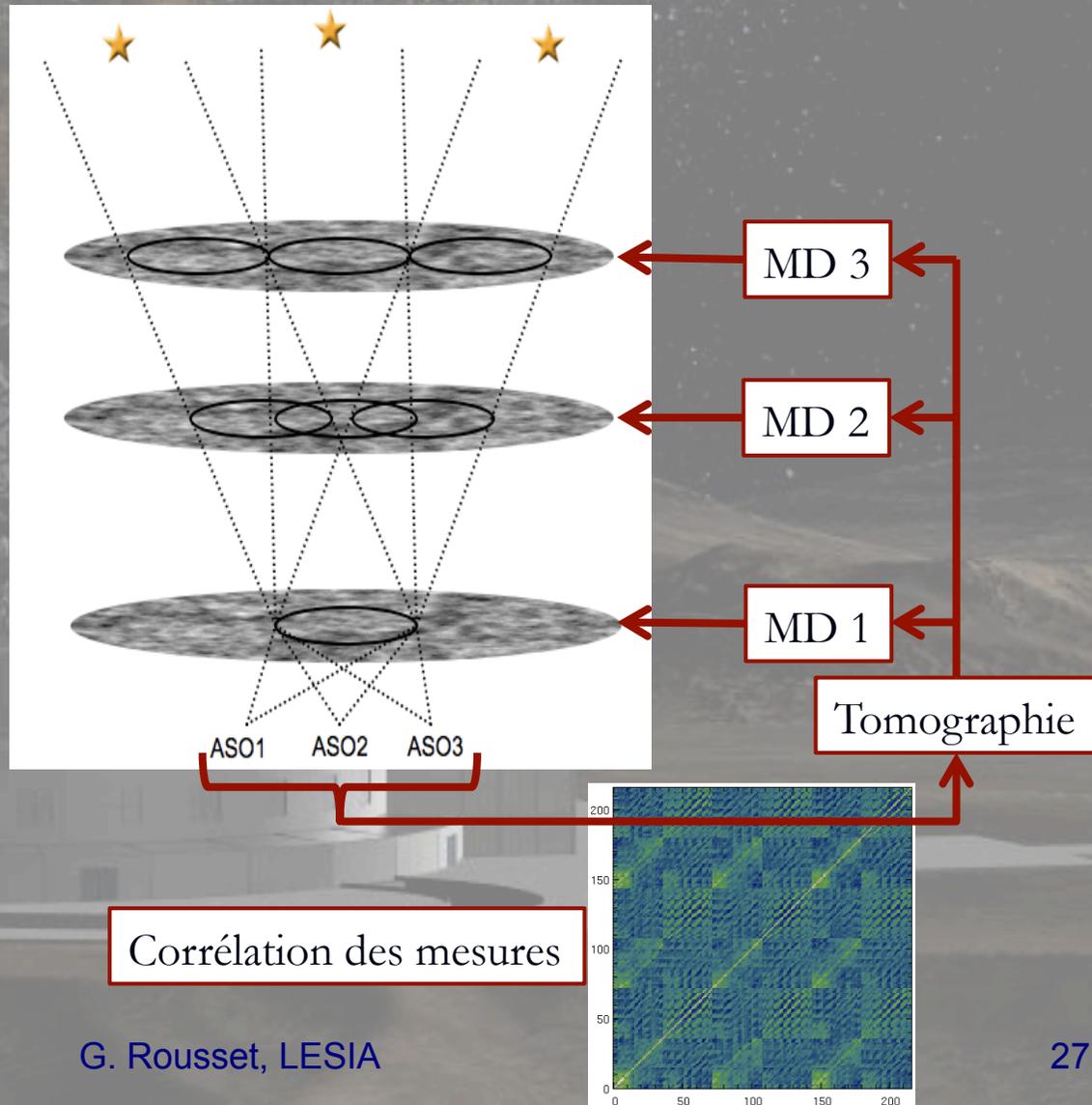
- Turbulence et optique adaptative
- Les ELT
- L'E-ELT
- Les optiques adaptatives de l'E-ELT
- Les instruments
- Conclusion

OA pour le grand champ ?

OA dite multi-conjuguée

Synthèse du volume turbulent :

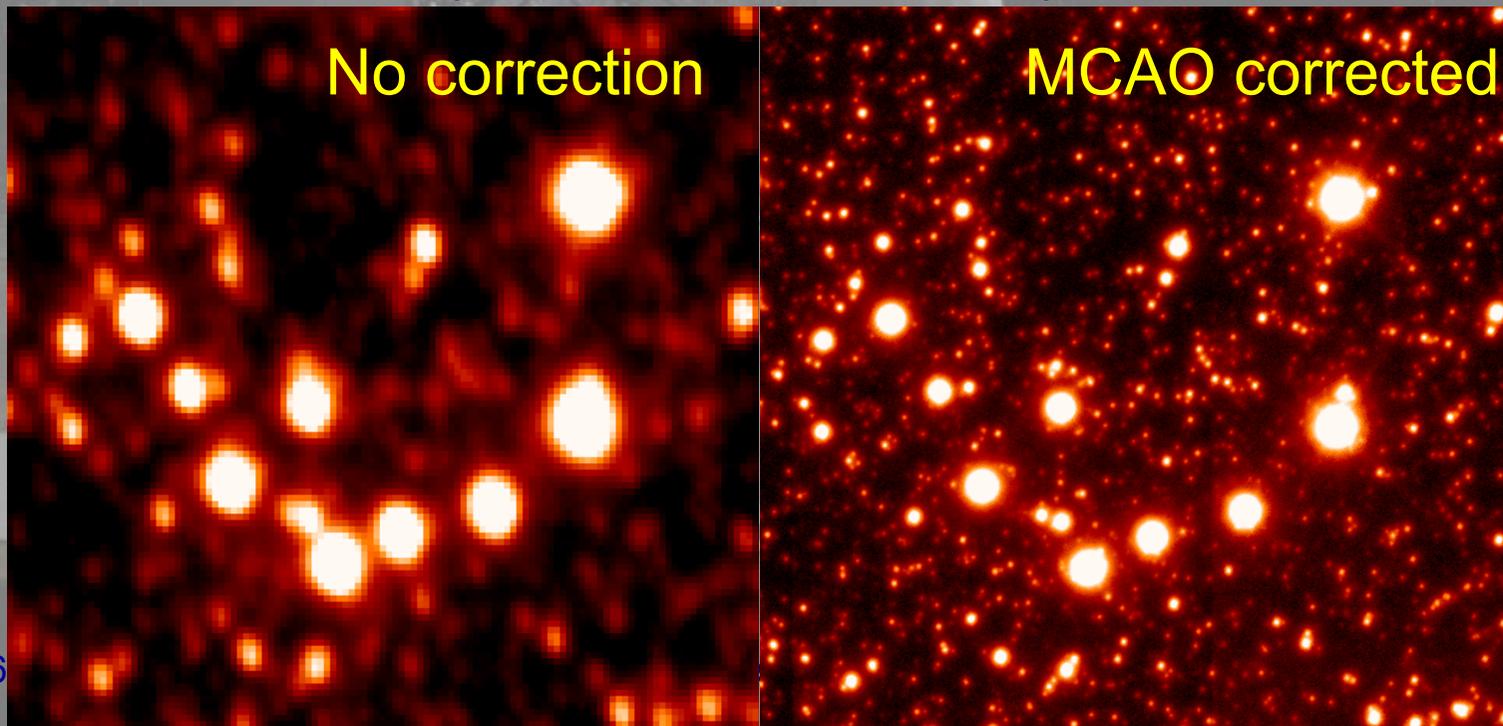
- Mesurer les fronts d'onde dans plusieurs directions (étoiles naturelles ou lasers)
- Reconstruire le volume turbulent par tomographie
- Corriger par plusieurs miroirs déformables conjugués aux altitudes prépondérantes



OA multi-conjuguée : 1^{ère} démonstration au VLT

Tél. 8m, 2 MDs à 60 actionneurs, 3 analyseurs, étoiles naturelles guides à 2 arcmin, seeing 0,7 arcsec

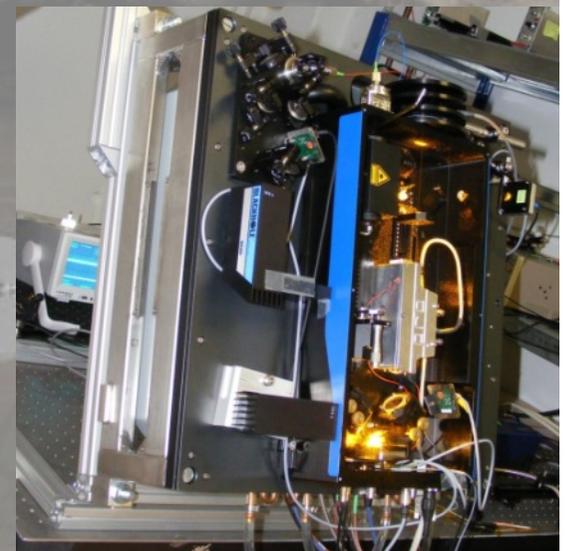
Omega Centauri (15^2 arcsec²) : 2,2 μ m, SR~20%
(Marchetti et al. 2007)



LGS et E-ELT

- Performance en couverture du ciel essentielle pour l'E-ELT ($> 50\%$)
- Disponibilité de NGS si grand champ
- Compenser l'effet de cône en multi LGS
- Fluctuations de la couche de Na : simulations, besoin de monitoring, validation requise

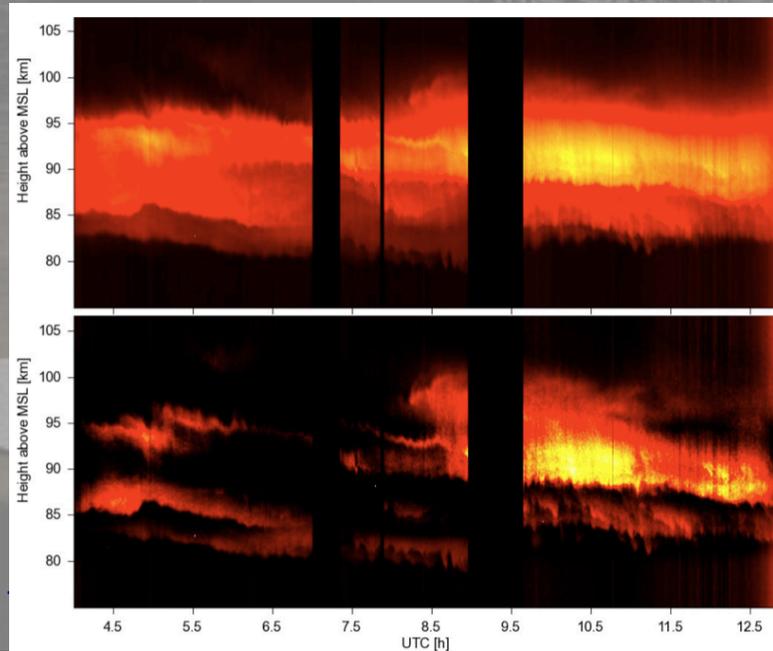
Solid state Laser : raie D2, 20W
Raman fiber amplifieur, doublé, CW
Kaenders et al, 2010



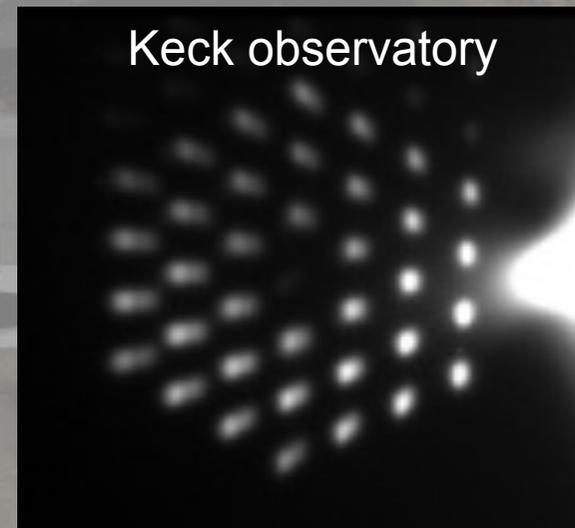
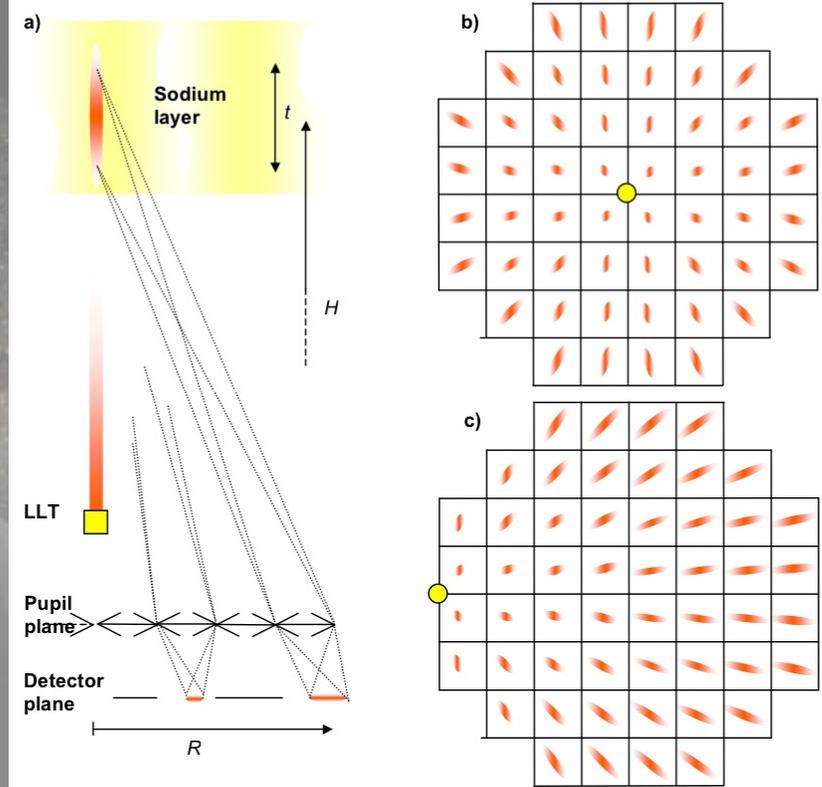
Elongation des spots SH

Quelle précision dans la mesure du front d'onde ?

Densité en Na, Pfrommer et al. 2010



APC

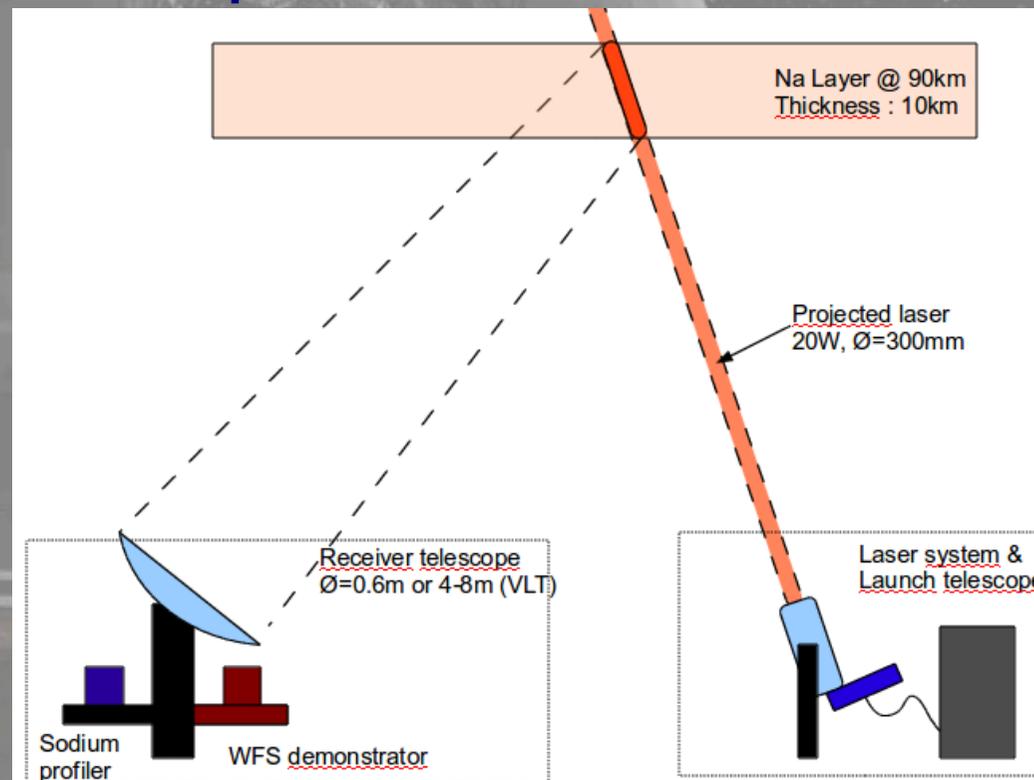


et, LESIA

30

Expérience proposée au WHT

Laser transportable (ESO) placé à 40m off-axis, sur le télescope (4,2m) observer la couche de Na, mesurer le front d'onde LGS et le comparer à celui d'une NGS

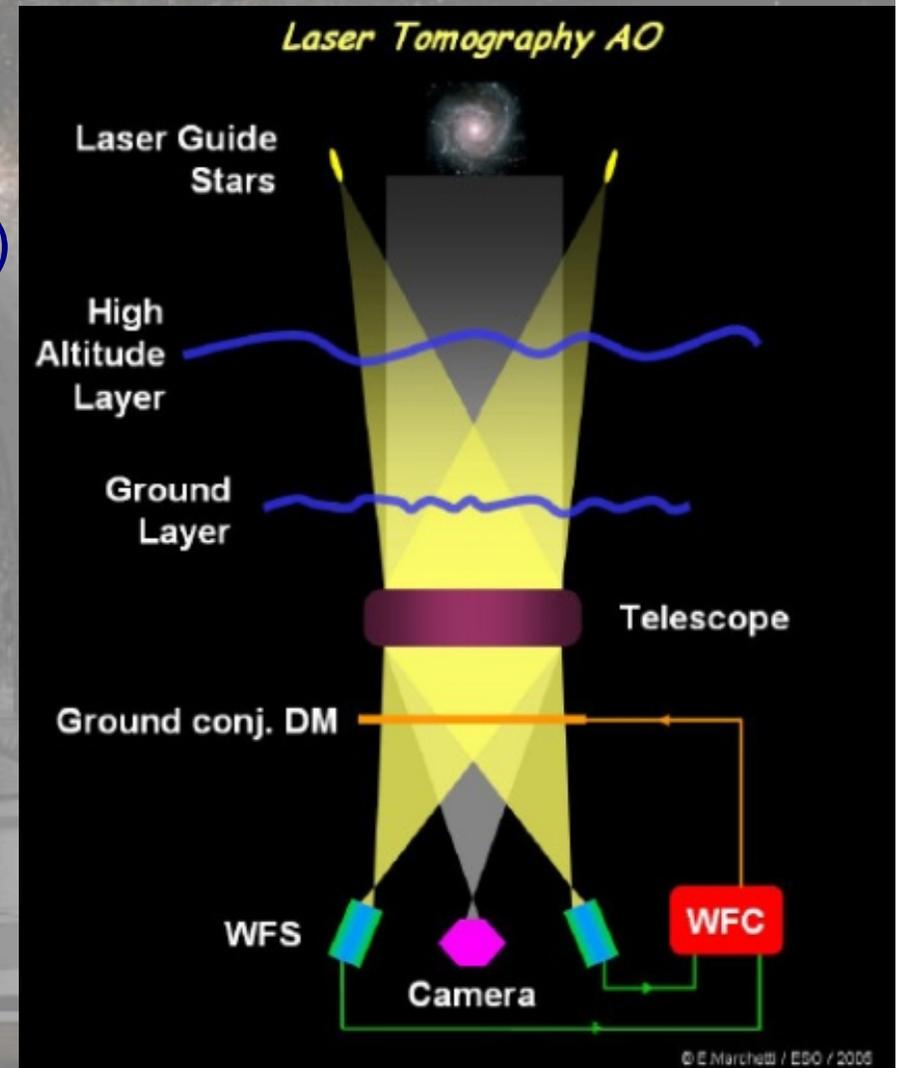


Compenser l'effet de cône : LTAO

Reconstruire le volume turbulent et projeter dans la direction de l'objet : tomographie laser (LTAO)

Module ATLAS

- 6 lasers, cercle de 4'
- Correction avec M4+M5
- 1 NGS proche IR
- SR=50% à $2,2\mu\text{m}$
- WFE=290nm
- Couverture ciel $\sim 90\%$

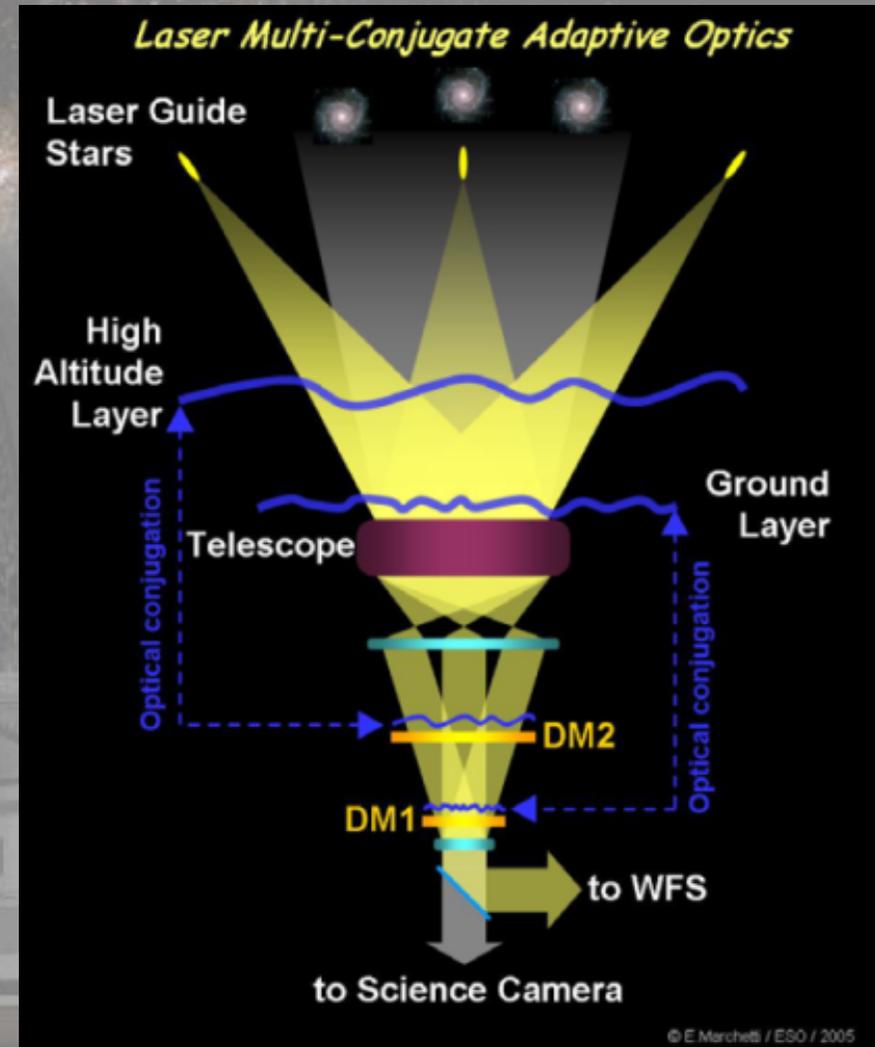


OA multiconjuguée (MCAO)

Accroître le champ

Module MAORY

- champ 1'x1'
- 6 LGS, cercle de 2'
- 3 NGS, FoV 2,6'
- 2 MD en plus
- SR~50% à 2,2 μ m
- Couverture 50%



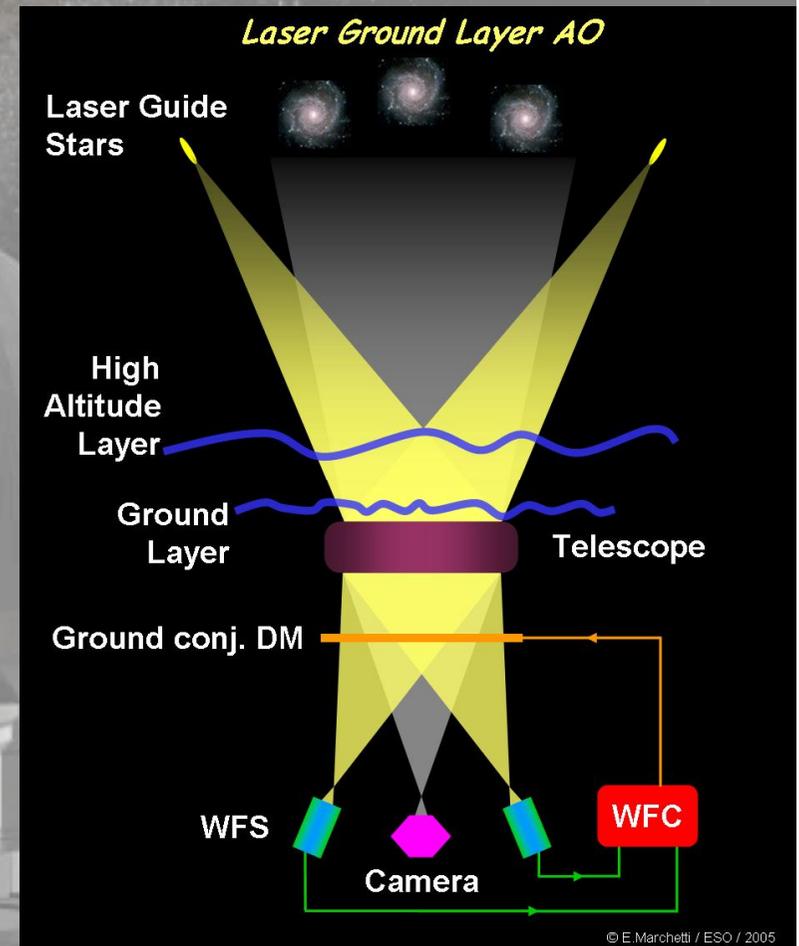
Le très grand champ ?

OA couche au sol : GLAO

Réduction du seeing d'un facteur 2 sur 10'x10'

Correction aberrations et vibrations du télescope

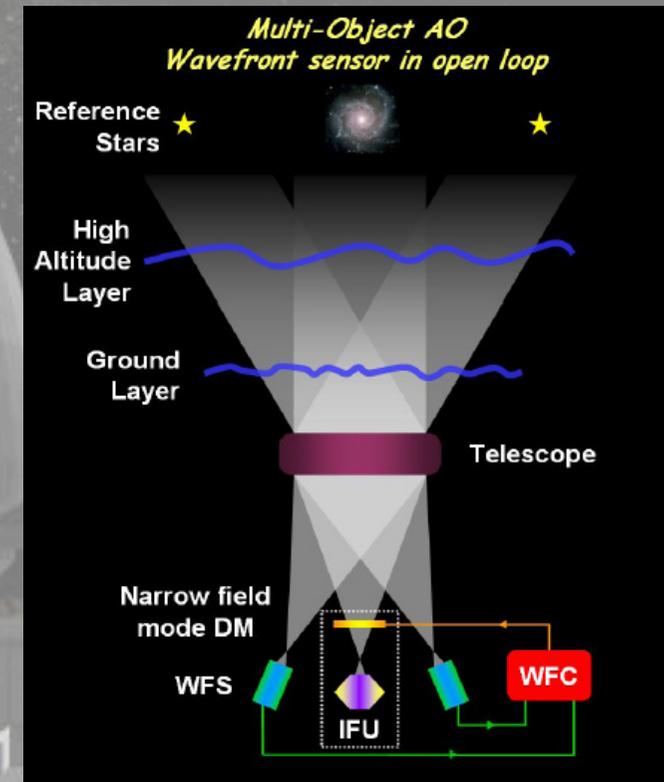
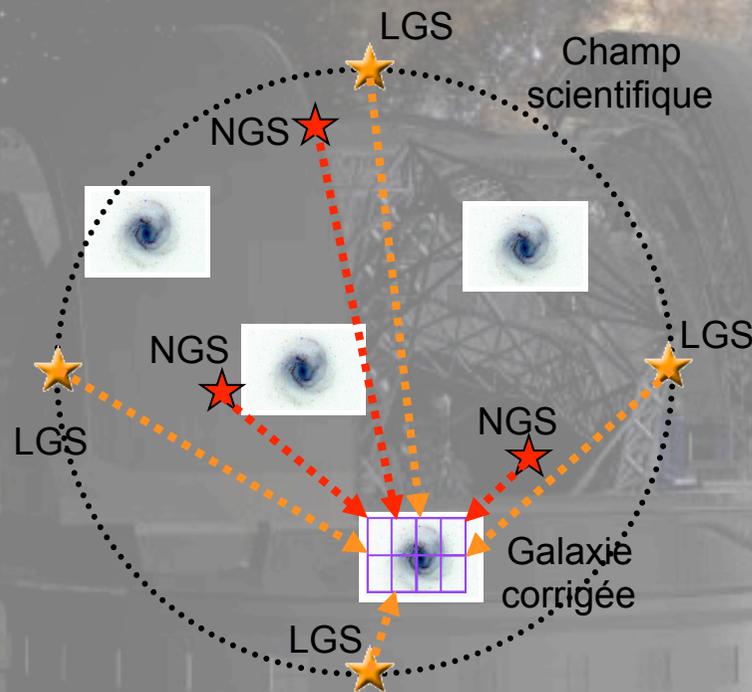
- 4 LGS
- 4 NGS
- M4 et M5 (+ M2, M3)



Le très grand champ ?

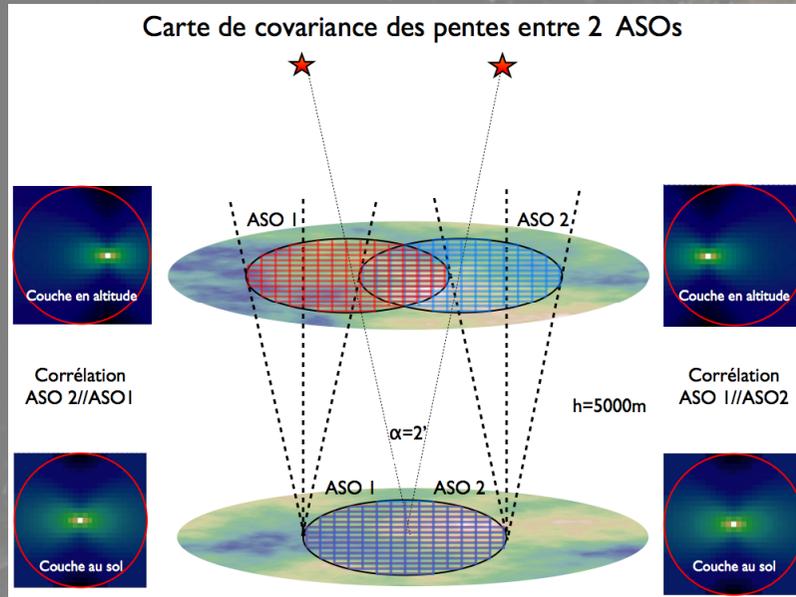
OA dite multi-objet (MOAO)

Observer plusieurs dizaines de galaxies dans un champ de 10' : découper le champ et bien corriger séparément chaque objet, donc un MD par objet !

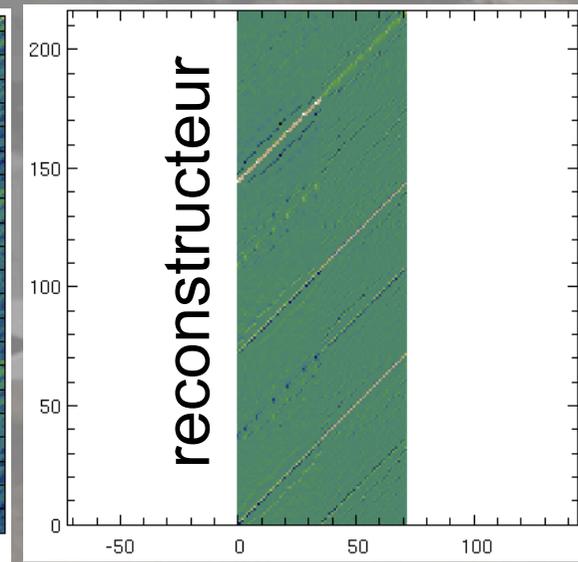
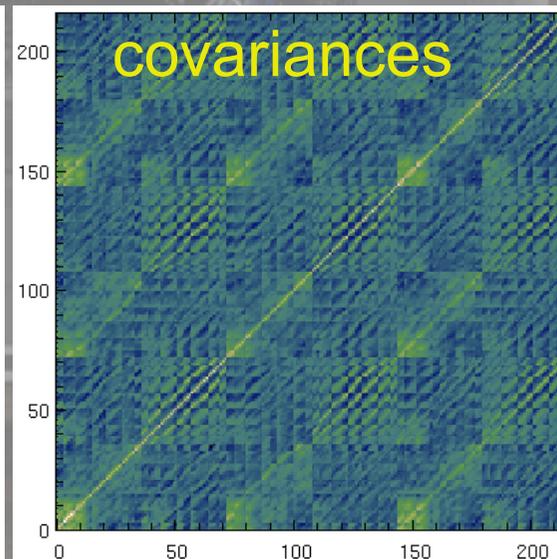
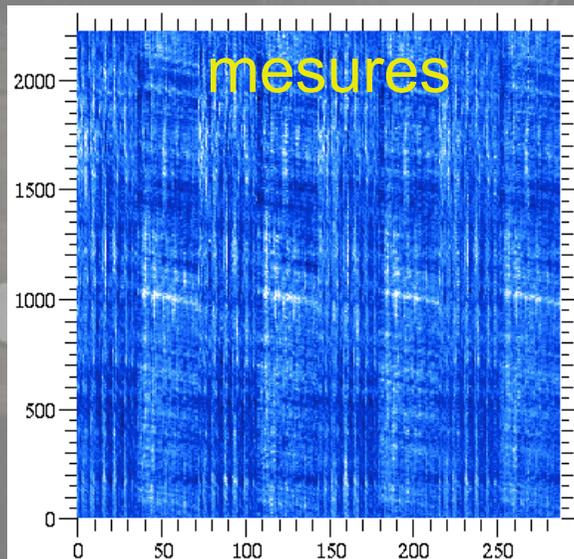


Mesurer en boucle ouverte la turbulence sur plusieurs LGS et NGS et par tomographie optimiser la correction du front d'onde pour chaque objet

Learn & Apply pour la MOAO



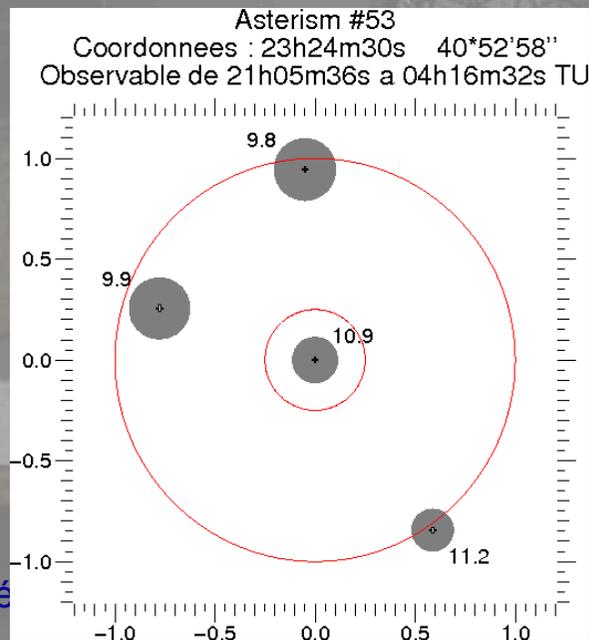
Le restructeur tomographique utilise la matrice de covariance des WFS mesurée sur le ciel et ajustée sur un modèle de turbulence (Vidal et al. 2010)



Démonstration de la MOAO

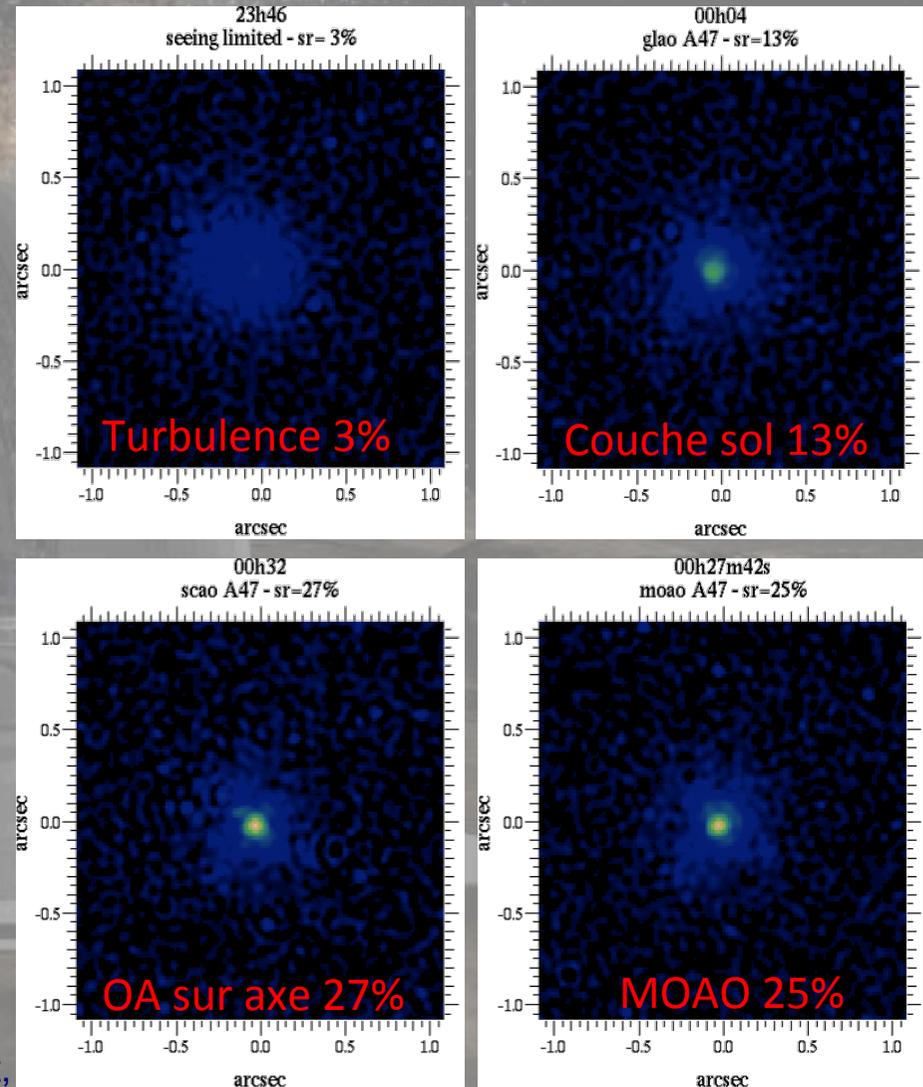
- WHT (4,2m) aux Iles Canaries
(Gendron et al., 2011)
- 3 WFS sur NGS (en BO)
 - Tomographie
 - 1 miroir déf. (52 action.) sur l'étoile sur axe en boucle ouverte
 - Prochaine étape : avec LGS !

Images à $1,5 \mu\text{m}$

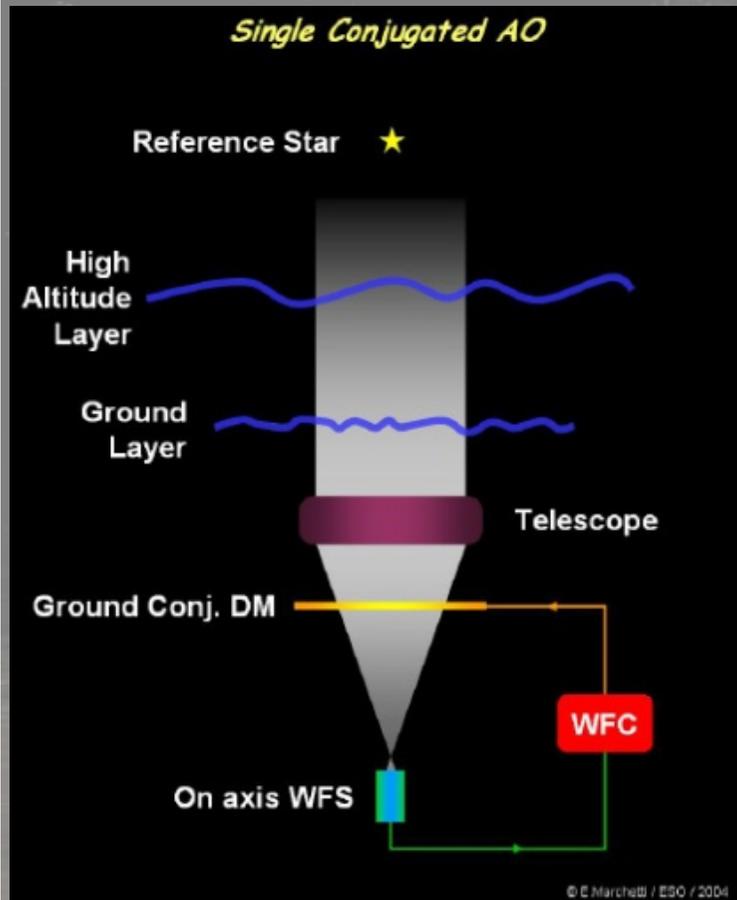


APC – 6 dé

Rousset,



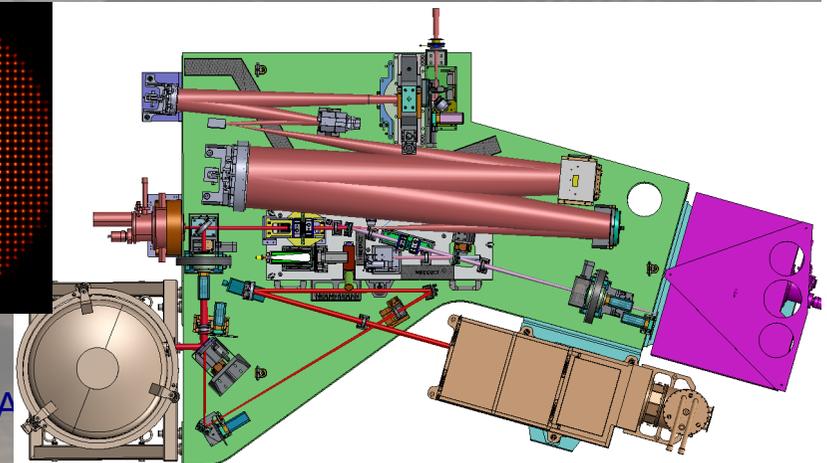
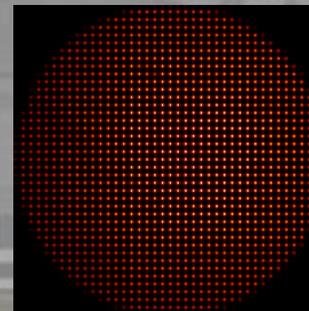
OA extrême : très haut contraste



Imagerie directe et spectroscopie des exoplanètes

- SR ~90% sur NGS
- WFE=80nm
- Contraste 10^{-9} à $0,1'$
- jusqu'à 30 000 actionneurs à 3 kHz !

SPHERE (VLT, 2012)



APC – 60

G. Rousset, LESIA

Plan

- Turbulence et optique adaptative
- Les ELT
- L'E-ELT
- Les optiques adaptatives de l'E-ELT
- **Les instruments**
- Conclusion

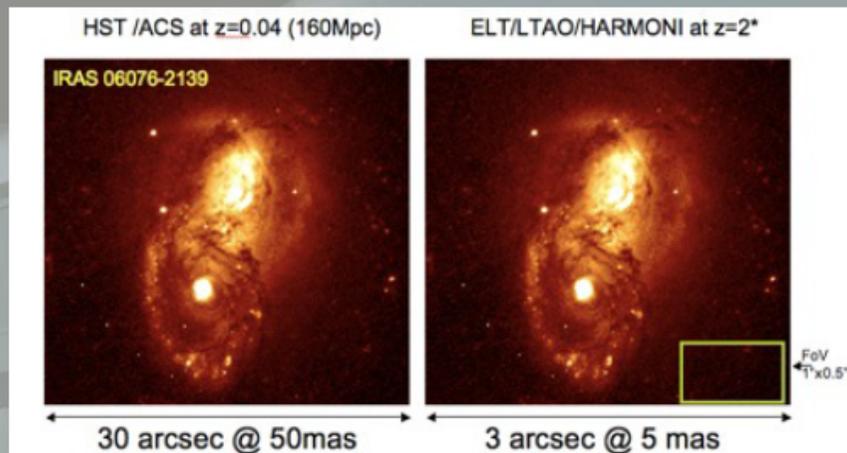
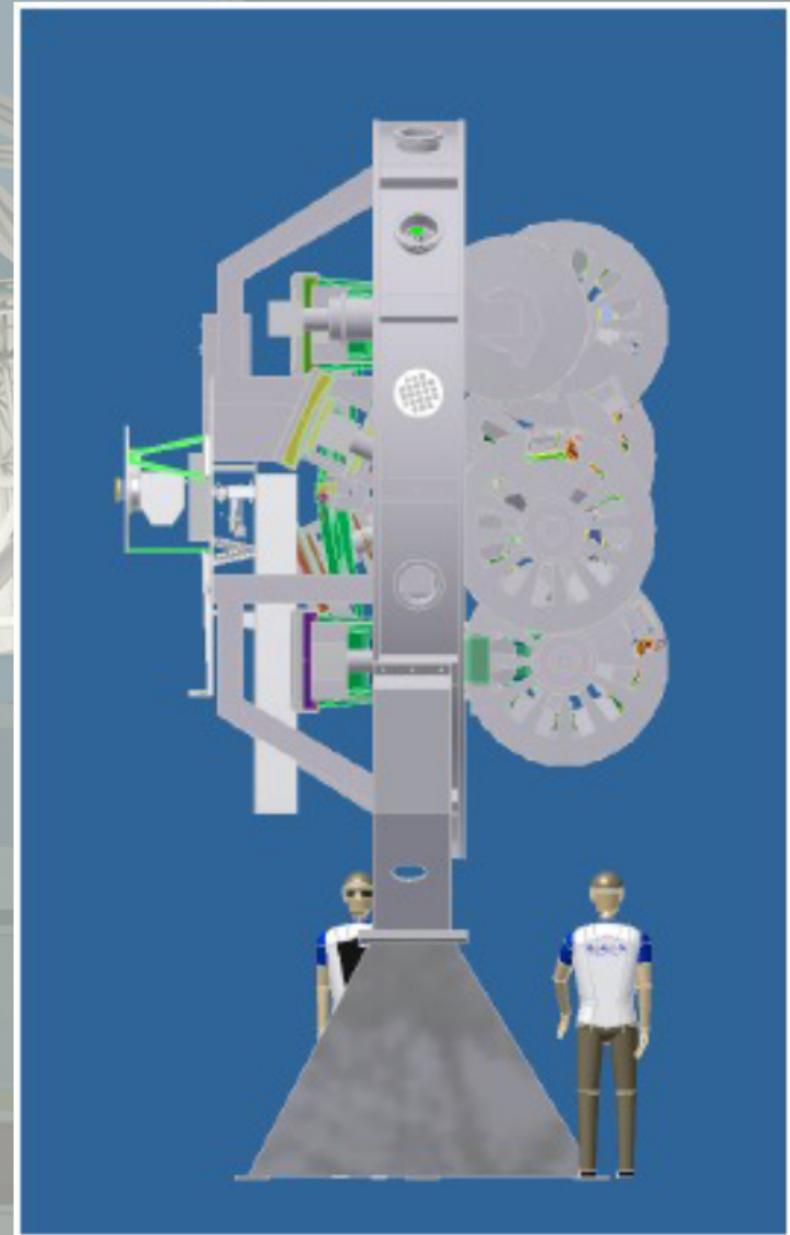
Instrumentation de l' E-ELT

- 11 études de Phase A menées entre 2007 et 2010 : 9 instruments et 2 modules d' OA
- Plus de 40 instituts européens et 300 chercheurs et ingénieurs
- Cas scientifiques, design préliminaire et plan de construction
- Première lumière scientifique (en 2022) avec Harmoni (IFU) et Micado (IR cam)
- Puis un MIR, un MOS et un HiReS

HARMONI Single field, wide band IFU, NIR spectrometer

PI: Niranjan Thatte,
Oxford, CRAL, CSIC, IAC, UK ATC, ONERA

- Wavelength range 0.47-2.45 μ m
- Spectral resolving power
 - $R \approx 4000, 10000, 20000$
- 4 spatial scales
 - 4mas, 10mas, 20mas, 40mas
- 4 fields of view
 - 0.5" x 1.0", 1.25" x 2.5"
2.5" x 5", 5" x 10"
- LTAO/ATLAS



ATLAS: laser tomography AO module

PI: Thierry Fusco
ONERA, GEPI, LESIA, UK
ATC, LAM

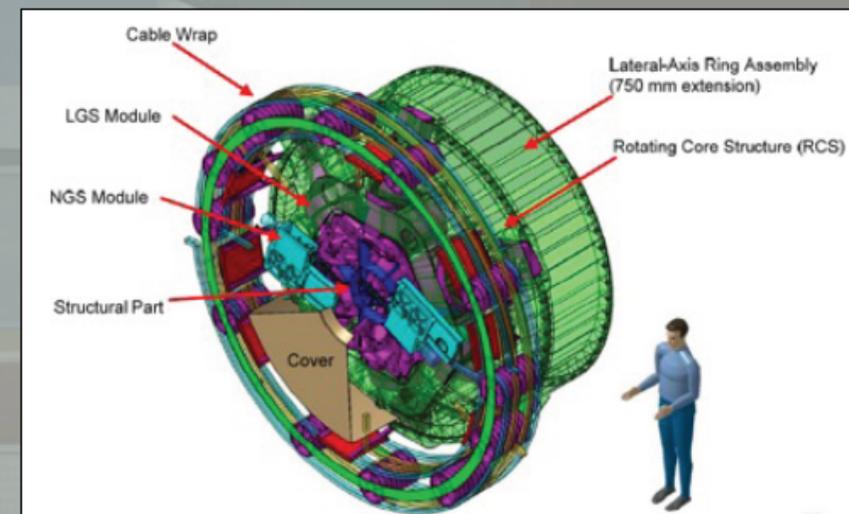
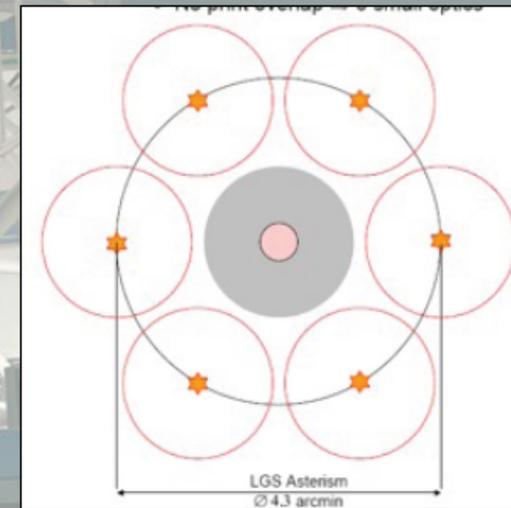


Advanced
Tomography
with Laser for
AO systems

Adaptive optics using laser guide stars

- Very high quality images (S.R. >50% in K) over ~30" field
- Excellent sky coverage
- Uses the telescope adaptive mirrors, simple design, >90% transmission
- No additional mirrors in the instrument optical path

- Instrument 'clients'
 - SIMPLE, HARMONI, METIS



MICADO: Diffraction limited NIR, Imaging Camera

PI: Reinhard Genzel
MPE, MPIA, USM, INAF-OAPD, NOVA, LESIA

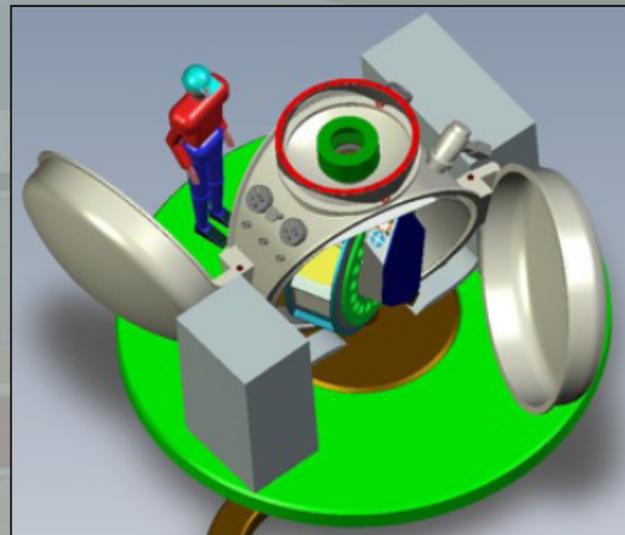
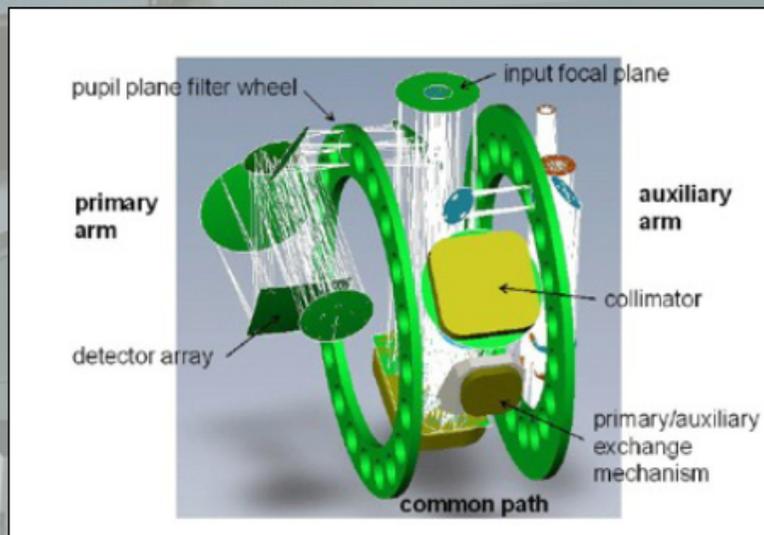
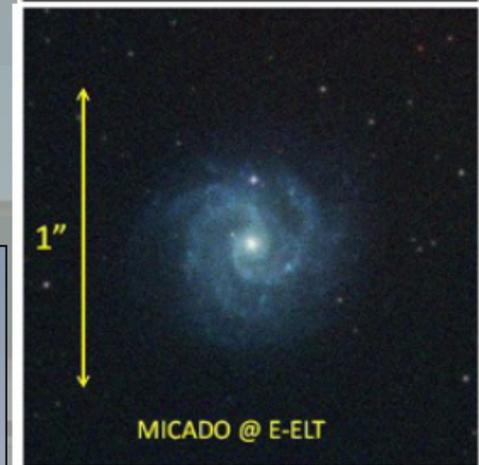
Primary Imaging Field

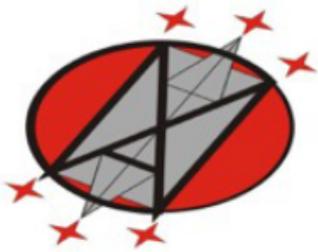
- 53" across, 3mas pix
- high throughput
- 4x4 HAWAII 4RG detectors
- ~20 filter slots

Auxiliary Arm

- 1.5mas & 4mas pixels
- imaging & spectra R=3000
- 1 HAWAII 4RG detector

AO System – MCAO/MAORY





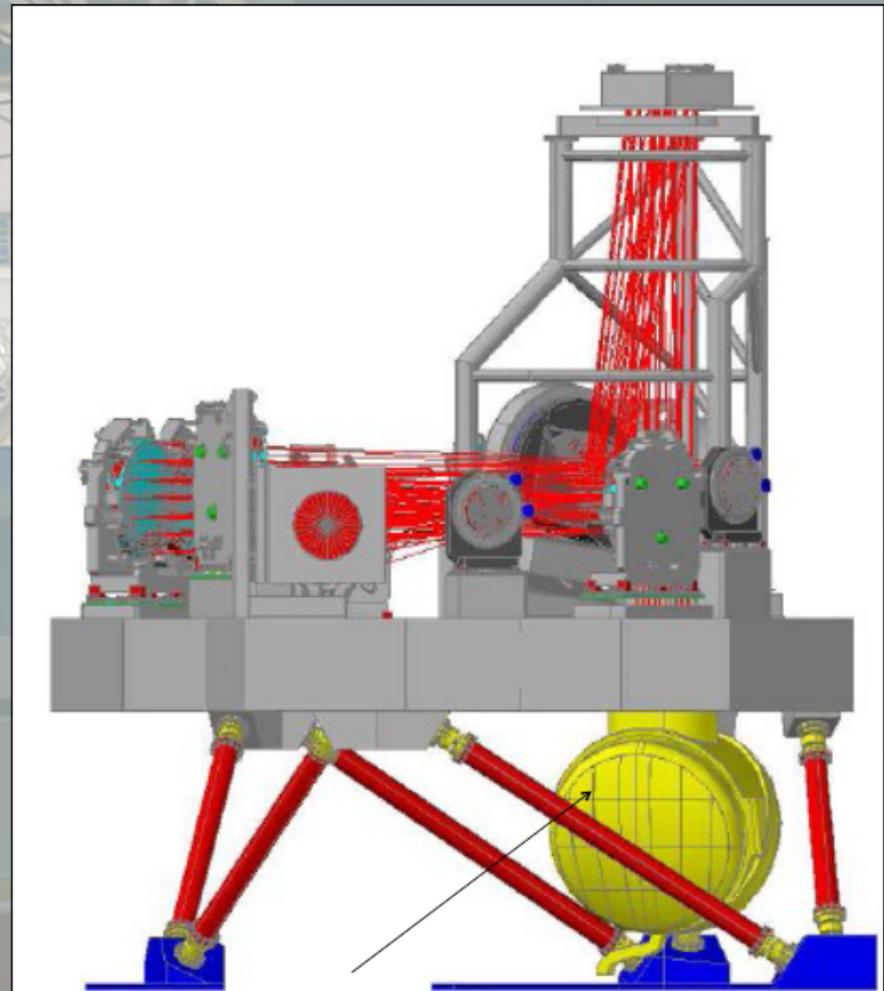
MAORY: multi-conjugate AO relay

PI: Emiliano Diolaiti

INAF (Bologna, Padova, Arcetri), ONERA

Multi-conjugate AO with 6 laser and 3 natural guide stars

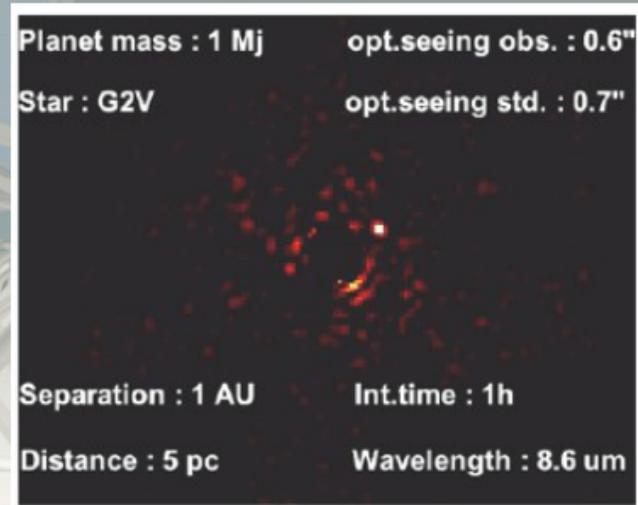
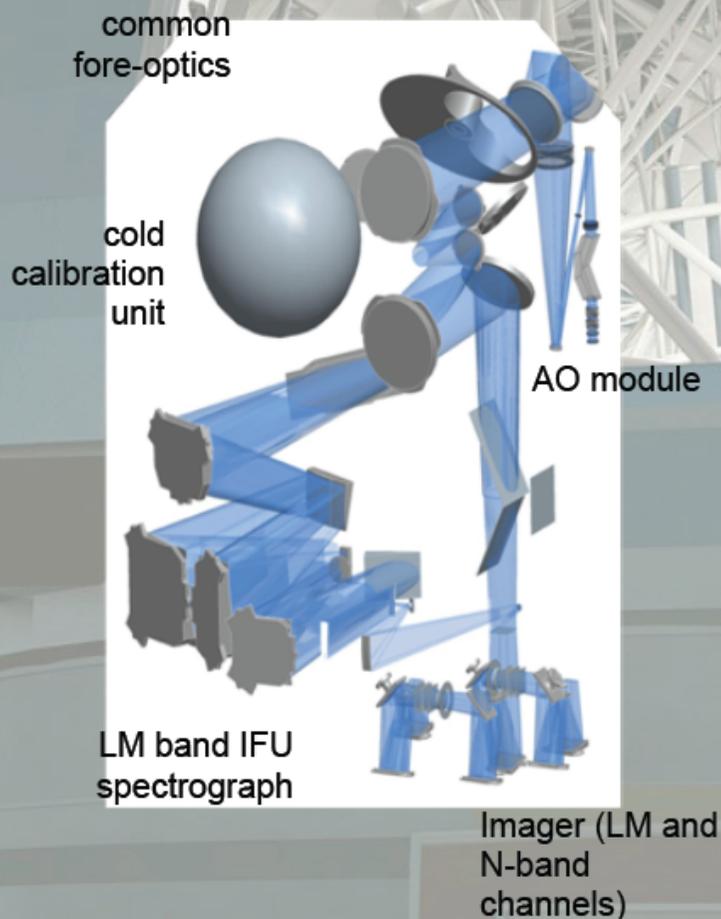
- $0.6 \mu\text{m} < \lambda < 2.4 \mu\text{m}$
 - Very high quality images (S.R. >50% in K) over a wide field - 2', Central 1' clear
 - MAORY deformable mirrors conjugated to atmospheric layers at 4km, 12.7km
 - Two output ports
-
- Instrument 'clients'
 - SIMPLE, MICADO





METIS: mid-IR imager and spectrograph

PI: Bernhard Brandl,
Nova, MPIA, CEA Saclay, KU Leuven, UKATC



- Diffraction limited **imager** [18"×18"]
- L/M band and N band
 - includes coronagraphy
 - $R \leq 5000$ long-slit spectrometer
 - includes polarimetry
- High resolution IFU [$\geq 0.4'' \times 1.5''$]
- **spectrograph** for L/M, ($R \sim 100,000$)
- LTAO/ATLAS plus on-board SCAO

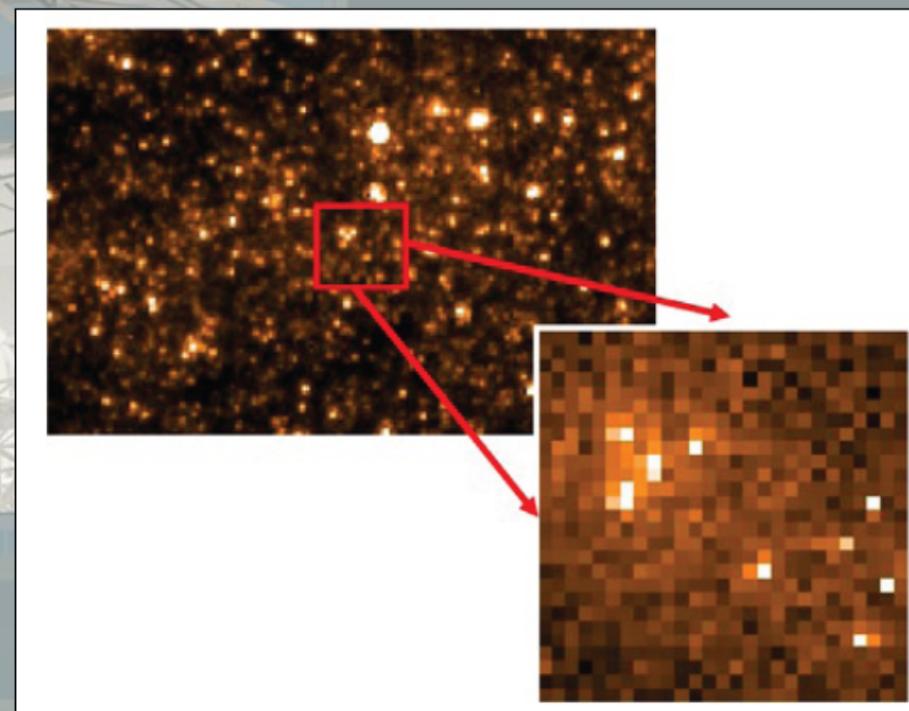
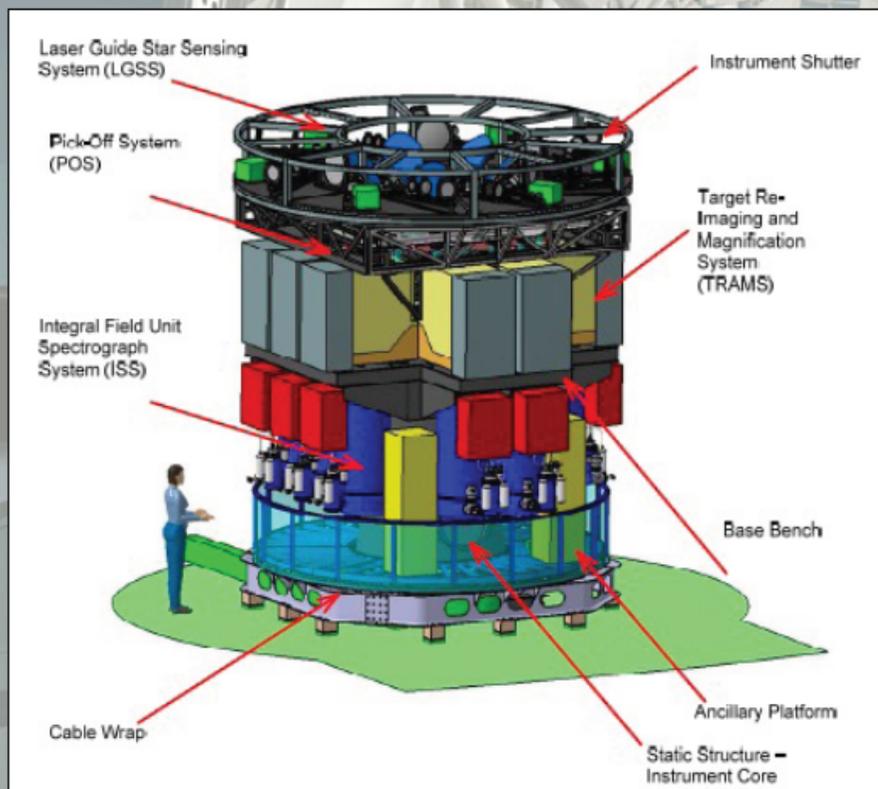
EAGLE: Wide-field, multi-IFU, AO-assisted NIR spectrograph



PI: Jean-Gabriel Cuby

Co-PI: Simon Morris

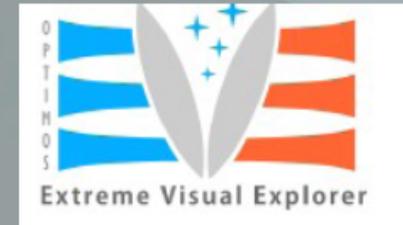
LAM, Uni. Durham, UK ATC, GEPI,
ONERA, LESIA



- Near-infrared:
0.8-2.45 μm
- Patrol field:
38 arcmin²

- 20-IFU fields:
1.65"x1.65"
- R~4000, 10000
- Multi-Object AO

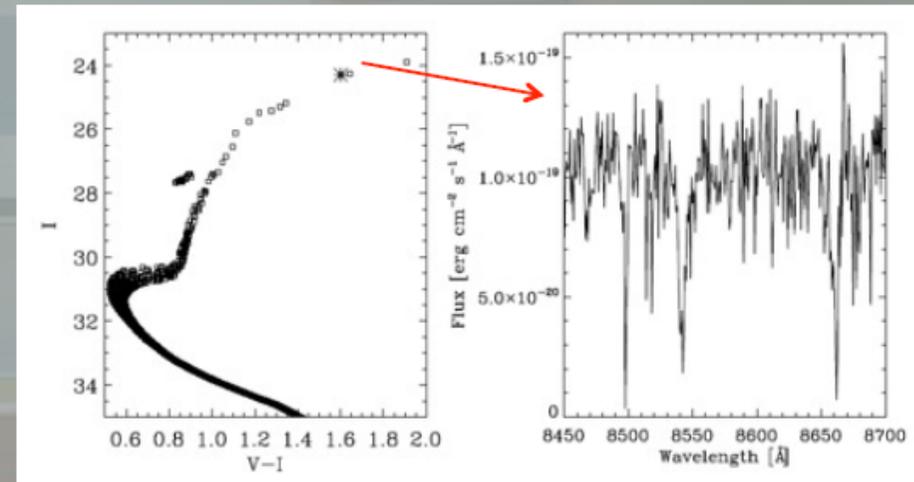
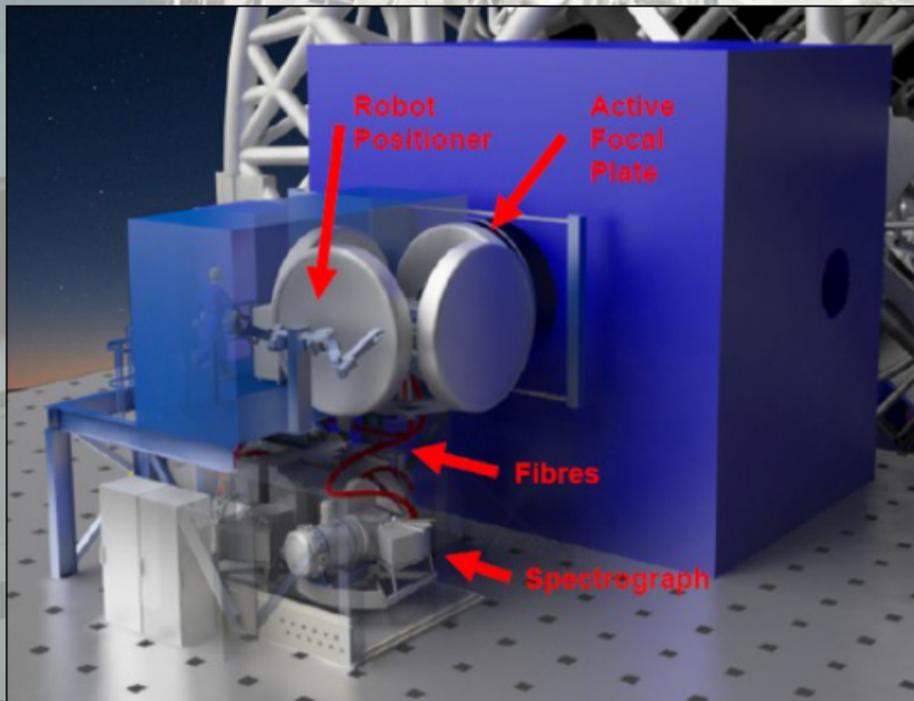
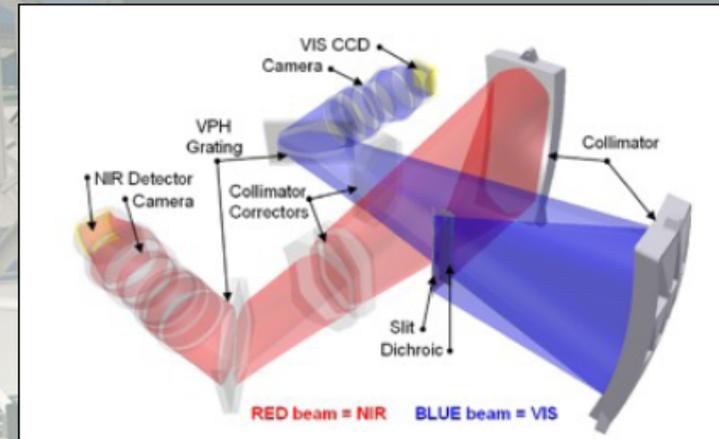
OPTIMOS-EVE - Extreme Visual Explorer



PI: Francois Hammer

GEPI,NOVA, INAF, RAL, Nils Bohr Institute

- 0.37 μm -1.7 μm
- Patrol field - $\sim 7'$
- 240 fibres / R \sim 5000
- 70 fibres / R \sim 15000
- 40 fibres / R \sim 30000
- 30 IFUs 1.8" x 3"
- 1 IFU 7.8"x13.5"
- Both IFUs / R \sim 5000



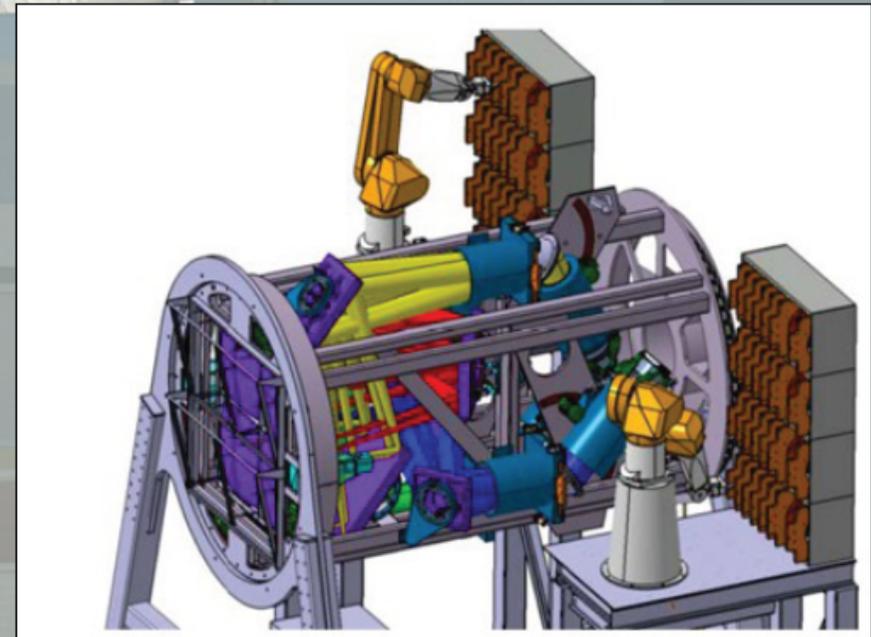
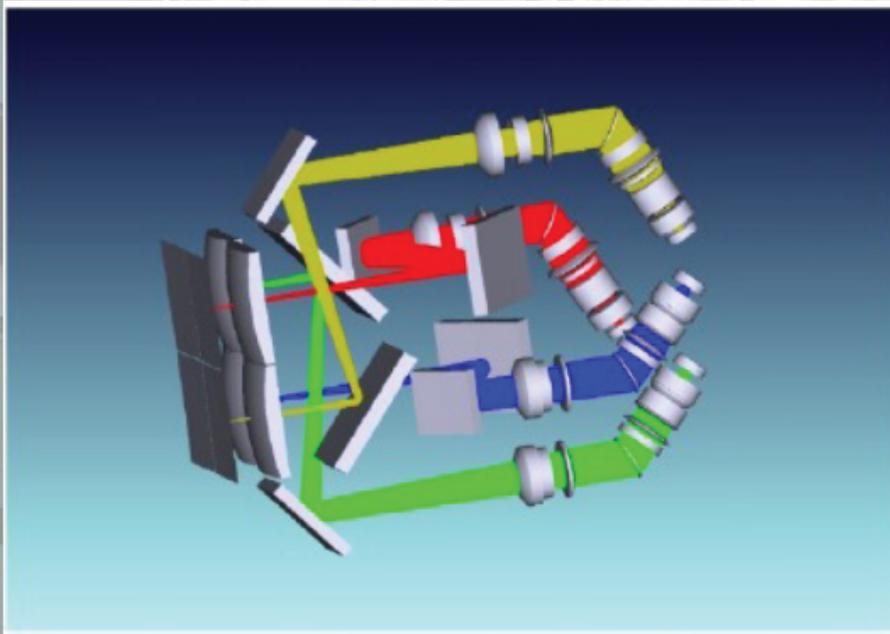
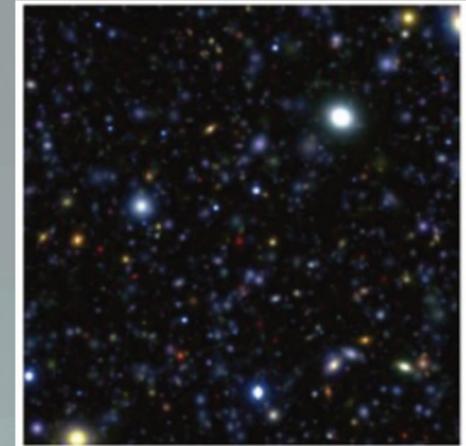
OPTIMOS-DIORAMAS: wide field imaging multi-slit spectrograph



PI: Olivier Le Fèvre

LAM, IASF-Milano, Obs. Haute Provence, HP, Obs. Genève, IAC

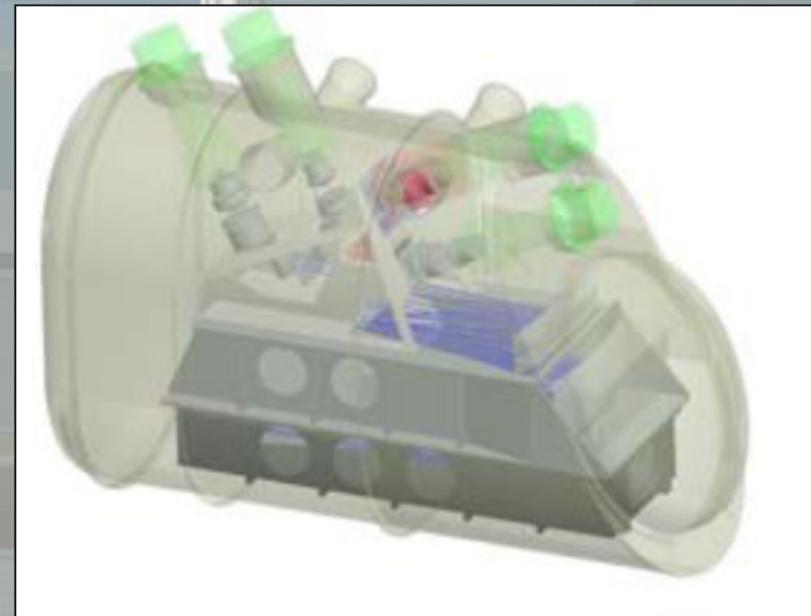
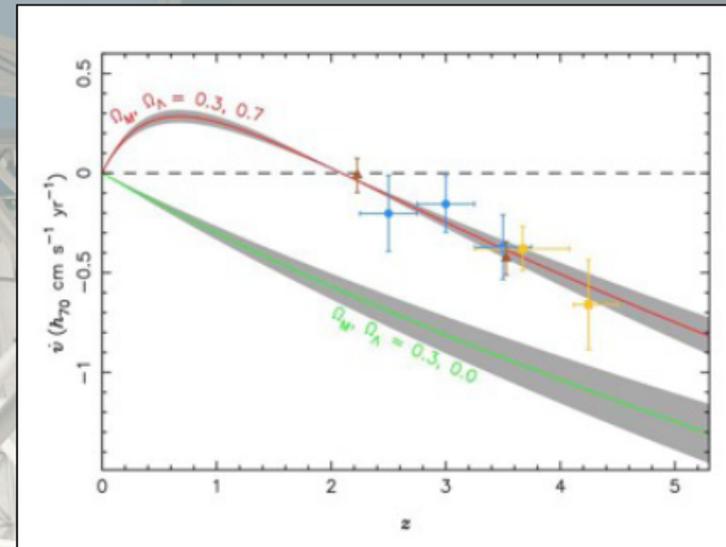
- MOS and Imager over 6.8'x6.8' FOV
- Standard visible and NIR filters for imaging
- 480 slits in the visible range, 120 for NIR
- $R \sim 300, 1000, 2500$ visible; 400, 800, 3000 for NIR



CODEX: high stability, high resolution visible spectrograph

PI: Luca Pasquini, ESO
Geneve Observatory, IAC,
INAF-Trieste and Brera, IoA
Cambridge

- field of view ($0.82''$ = point sources)
- $0.37\text{-}0.71\mu\text{m}$
- $R\sim 130,000$
- $\sim 2\text{cm s}^{-1}$ Doppler precision over 30yrs
- no adaptive optics
- located in the coudé room



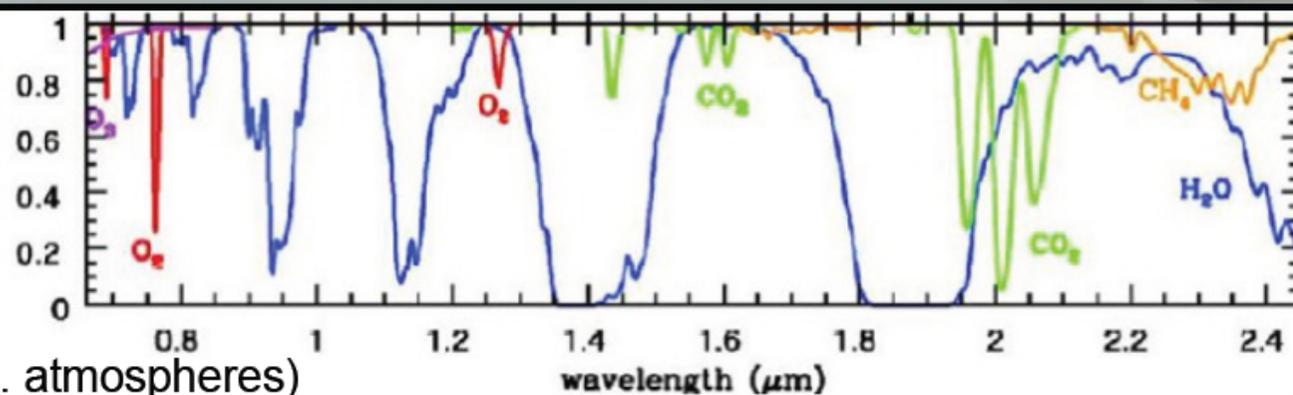
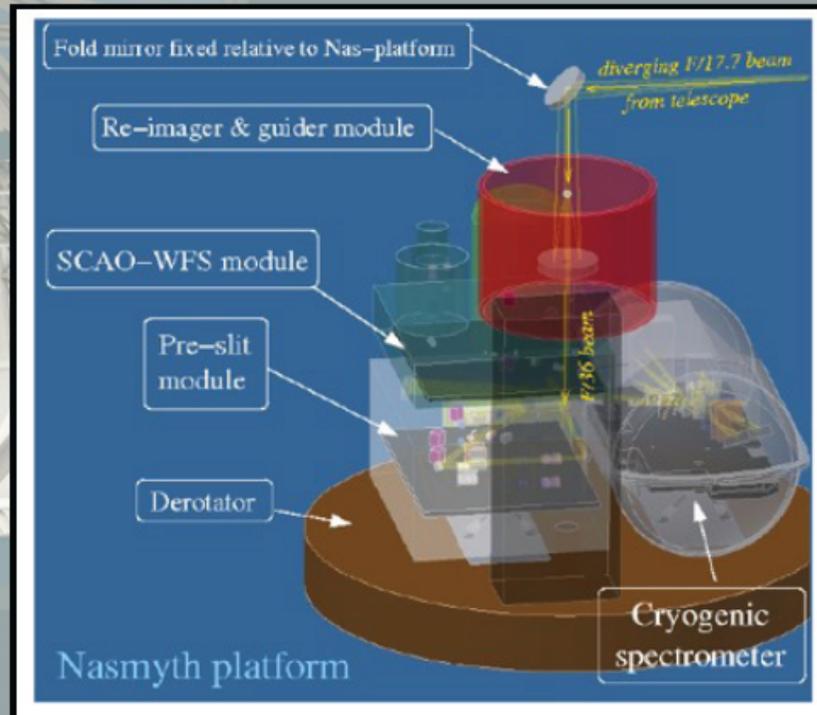
simple

a high resolution near-IR spectrograph for the E-ELT

PI: Livia Origlia, Bologna
INAF, UAO, TLS, PUC

- 0.84-2.5 μm
- Complete spectrum
- $R \sim 130,000$
- Slit: 27x450mas

- SCAO on-board
- MCAO/MAORY or LTAO/ATLAS



Exoplanets (incl. atmospheres)

EPICS: exo-planet imaging camera and spectrograph

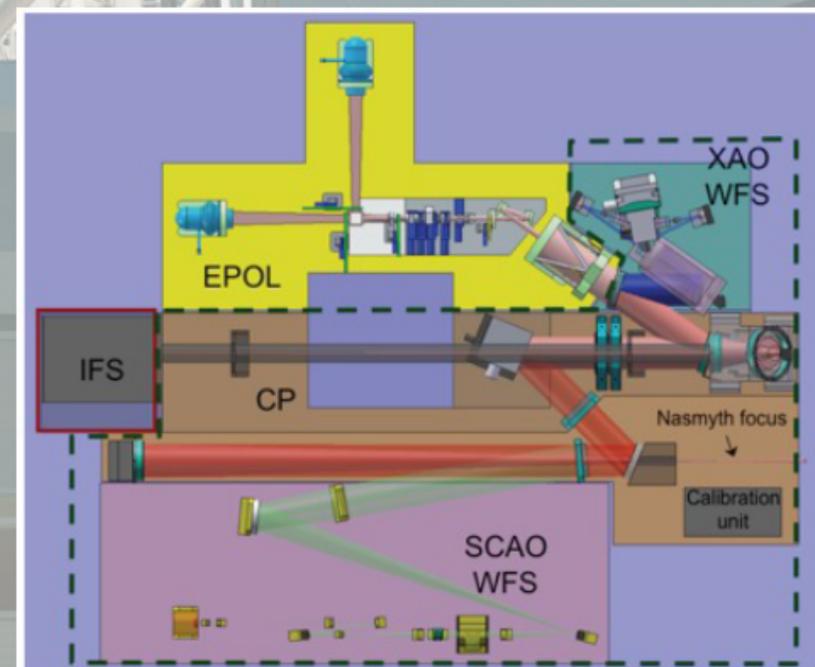
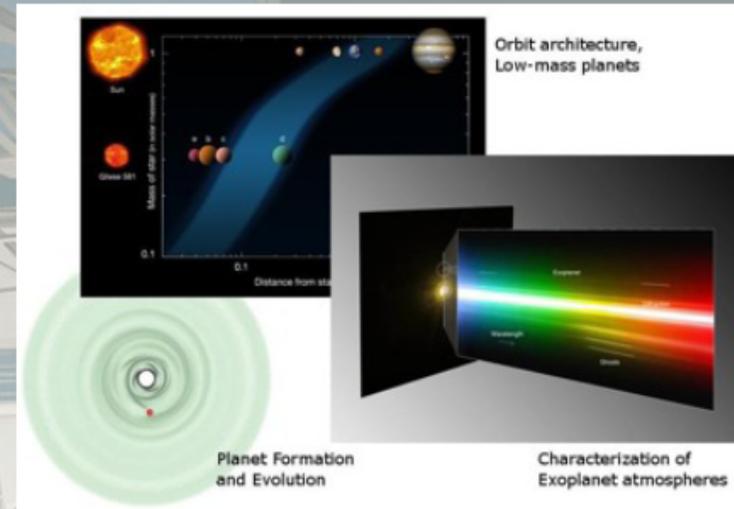


PI: Markus Kasper, ESO
LAOG, LESIA, Uni. Nice, LAM, ONERA,
Uni. Oxford, INAF, ETH Zurich, NOVA

- IFS 0.95-1.65 μ m
- FOV: 0.8" x 0.8"/2.33mas
- 0.8" x 0.014" long slit
- R = 125, 1400 and 20000

- EPOL 0.6-0.9 μ m
- Coronagraphic polarimeter
- FOV: 2" x 2"/1.5mas

Contrast ratios – 10^{-8} – 10^{-9}
XAO – very high (90%) Strehl



Conclusion

- L'E-ELT : un outil exceptionnel pour l'astrophysique
- Télescope actif et adaptatif : gain énorme en sensibilité et résolution
- Élément clef : l'optique adaptative
 - étoiles lasers
 - grand champ et tomographie
 - grand nombre d'actionneurs
 - démonstrations de concepts
- Proposition de construction faite au conseil de l'ESO après 5 ans d'études
 - Décision en mars 2012 avec entrée du Brésil
 - Première lumière du télescope 2021

Merci !

