



**Miroirs déformables pour l'Optique Adaptative :
Stratégies de dimensionnement**

Thierry Fusco

ONERA / Optics department

(Thierry.fusco@onera.fr)

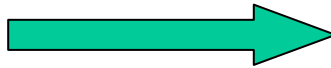
A. Costille, J.-M. Conan, C. Petit, P. Jagourel



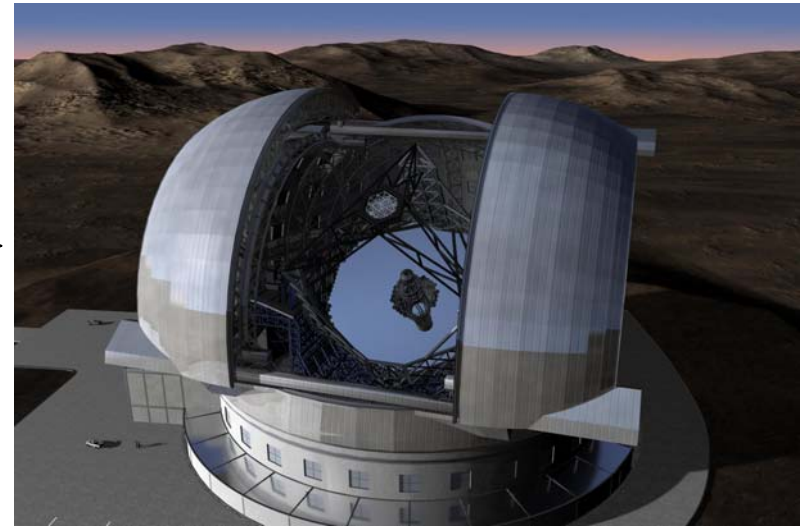
r e t o u r s u r i n n o v a t i o n

Les enjeux : Optique adaptative et astronomie

Aujourd'hui VLT



Demain E-ELT



- Développement de nouvelles technologies pour permettre l'augmentation de la taille des télescopes
 - Développement de l'optique adaptative et des instruments
- ⇒ Développement de la technologie pour les miroirs déformables
micro DM (pas ~ 400) \rightarrow Large DM (pas ~ 3 cm)

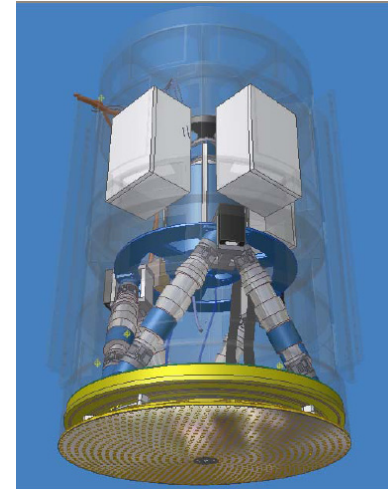
Paramètres pertinents pour un DM

- le nombre de degrés de liberté (i.e. d'actionneurs)
- la dynamique des actionneurs (stroke en μm)
- forme des actionneurs (fonction d'influence)
- la dynamique temporelle (Bandwidth, khz)
- la taille de la pupille (dimensionnant pour l'instrument considéré)
- le type de fonctionnement (BF, BO)

Différents types de MD

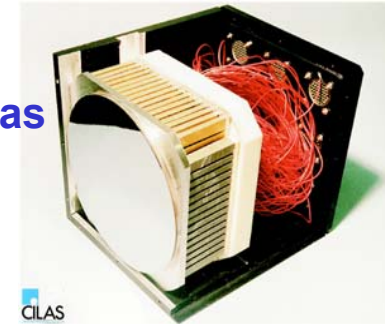
Arcetri-Microgate-ESO

- Développement de grands miroirs pour les télescopes
- Développement de miroirs plus petits et plus compacts pour les instruments

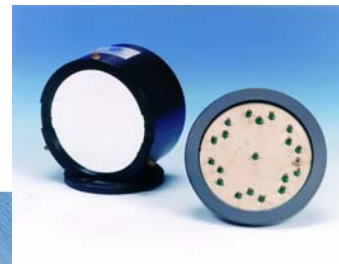


- Miroir de type SAM : piezo-électrique à empilement

Cilas



- Miroir bimorphe : disposition d'électrodes entre deux plaques piezo-électriques

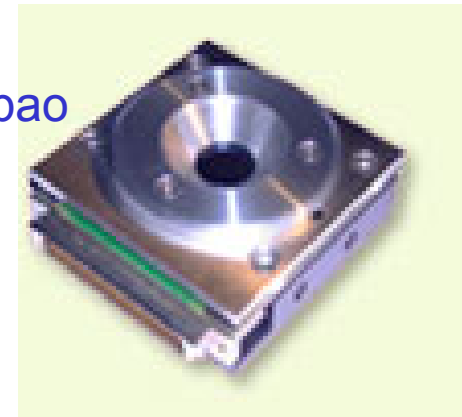


Cilas

Nouveaux développements des MD

- Miroirs à Cristaux liquides
- Mini-miroirs
 - Adaptation des technologie SAM, Bimorphe ou magnétique à des miroirs de petites tailles
- Micro-miroirs (MOEMS)
 - Boston MicroMachine
 - Observatoires de Grenoble et de Marseille
 - actionneurs électrostatiques - miroir membrane

Alpao



	Forces des actionneurs	Epaisseur des plaques
Miroirs à actionneurs PZT (ou électrostrictifs) <ul style="list-style-type: none">- à actionneurs discrets- bimorphes (plaques minces)	↓ 1 à 10^3 N	↓ mm
Miroirs à actionneurs magnétiques <ul style="list-style-type: none">- membranes activées "à distance"	qq 10^{-3} N	qq 10^{-2} mm
Miroirs à actionneurs électrostatiques <ul style="list-style-type: none">- à actionneurs discrets- à membranes activées "à distance"	qq 10^{-6} N	qq 10^{-3} mm

Etat de l'art : la course

Miroirs à actionneurs PZT (ou électrostrictifs)

- à actionneurs discrets
- bimorphes (plaques minces)

Miroirs à actionneurs magnétiques

- membranes activées "à distance"

Miroirs à actionneurs électrostatiques

- à actionneurs discrets
- à membranes activées "à distance"

Course		
petite tweeter	moyenne VLT	grande ELT
3	-> 10	-> 50 μm
Mini	Classique	M4
		-> 100μm
		10 -> 100μm
3	-> 6μm	
		8μm

Etat de l'art : les bandes passantes

Miroirs à actionneurs PZT (ou électrostrictifs)

- à actionneurs discrets
- bimorphes (plaques minces)

Miroirs à actionneurs magnétiques

- membranes activées "à distance"

Miroirs à actionneurs électrostatiques

- à actionneurs discrets
- à membranes activées "à distance"

Bandes passantes

>10kHz (Rappel plaque)

1kHz (cf. e/d^2)

qq100Hz (cf. e/d^2)

qqkHz (Rappel membrane)

1kHz (cf. e/d^2)

Etat de l'art : nombre d'actionneurs potentiels

Miroirs à actionneurs PZT (ou électrostrictifs)

- à actionneurs discrets
- bimorphes (plaques minces)

Miroirs à actionneurs magnétiques

- membranes activées "à distance"

Miroirs à actionneurs électrostatiques

- à actionneurs discrets
- à membranes activées "à distance"

Nombre d'actionneurs envisagé

185 → 1377 → 6000
(NOAS) (SPHERE) (E-ELT)

200
(subaru)

52 → 240 → ?
(BOA)

4000 → ?
(GPI)

100

Technologies et modes de fonctionnement

Miroirs à actionneurs PZT (ou électrostrictifs)

- à actionneurs discrets
- bimorphes (plaques minces)

Miroirs à actionneurs magnétiques

- membranes activées "à distance"

Miroirs à actionneurs électrostatiques

- à actionneurs discrets
- à membranes activées "à distance"

Mode de Fonctionnement

BF

BO

**Non
Hystérésis
Sauf que !***

Ça

Va

Pour

Oui

Tous

Merci !

Oui

Oui

***une commande en courant supprimerait l'hystérésis du PZT**

Les applications

Miroirs à actionneurs PZT (ou électrostrictifs)

- à actionneurs discrets
- bimorphes (plaques minces)

Miroirs à actionneurs magnétiques

- membranes activées "à distance"

Miroirs à actionneurs électrostatiques

- à actionneurs discrets
- à membranes activées "à distance"

APPLICATION

Tous usages !

Plutôt WOOFER

Plutôt WOOFER

Plutôt TWEETER

Jouet de
laboratoire

Miroirs à actionneurs PZT (ou électrostrictifs)

- à actionneurs discrets
- bimorphes (plaques minces)

Miroirs à actionneurs magnétiques

- membranes activées "à distance"

Miroirs à actionneurs électrostatiques

- à actionneurs discrets
- à membranes activées "à distance"

FOURNISSEURS

CILAS (F)
XINETICS (USA)

CILAS (F)

ALPAO (F)

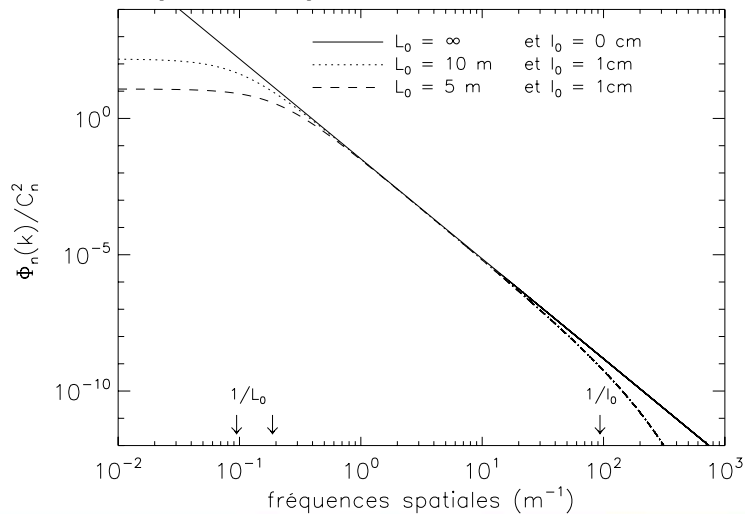
BMM (USA)

OKO (NL)

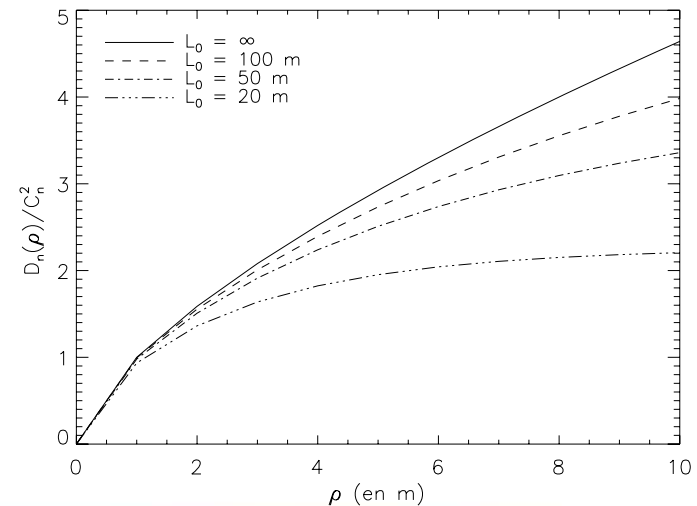
Turbulence atmosphérique / spécifications DM

- Turbulence : ro/seeing (0.5'' → 2''), L_0 (25 → 100 m). Important pour ELT
- Miroir: phicorr = IM u IM matrice d'influence, colonnes = IF ; pitch
- IF = Gauss / Dble Gauss **normalisée** paramétrée par couplage mécanique
couplage = 25 à 45% , jusqu'à 60-70 % pour certaines technologies
- Principe simulation :
 - $u = P_{DM} \text{ phiturb} = (IM^T IM)^{-1} IM^T \text{ phiturb}$ avec en général phiturb hors tip-tilt
 - Phicorr = IM u
- Stats sur phiturb , phicorr , u
 - Variance fitting = variance de phires = phiturb – phicorr = $K (\text{pitch} / \text{ro})^{5/3}$
 - Stroke, interstroke sur phiturb , phicorr , u

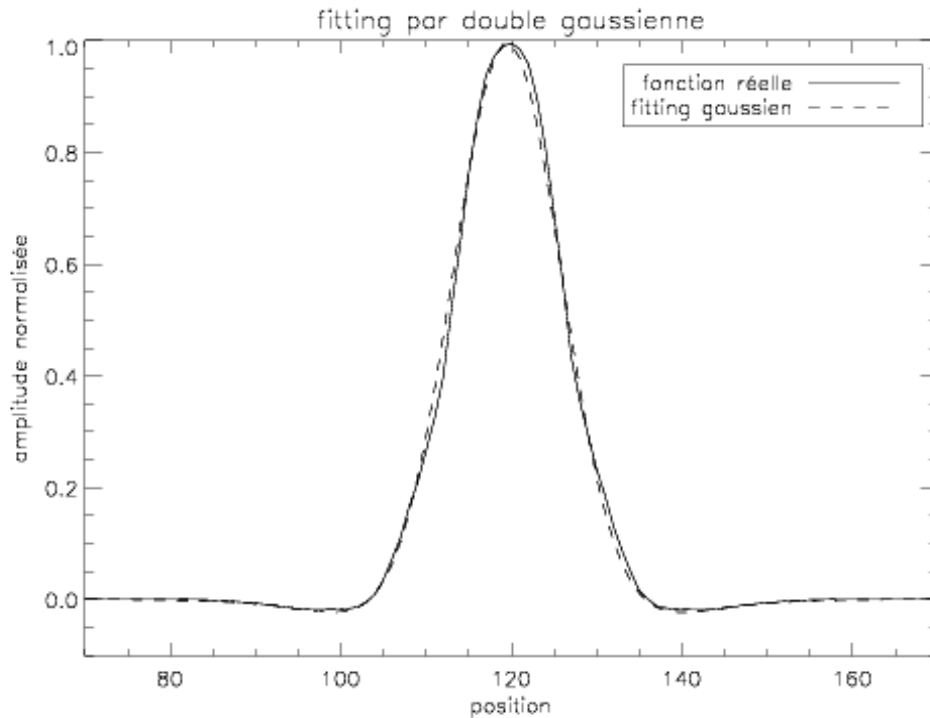
Densité spectrale de puissance des fluctuations d'indice



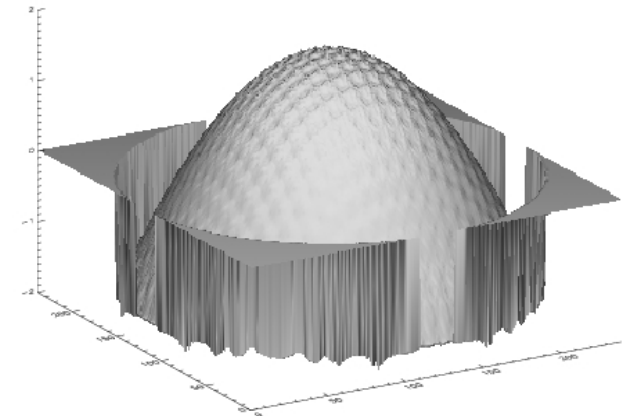
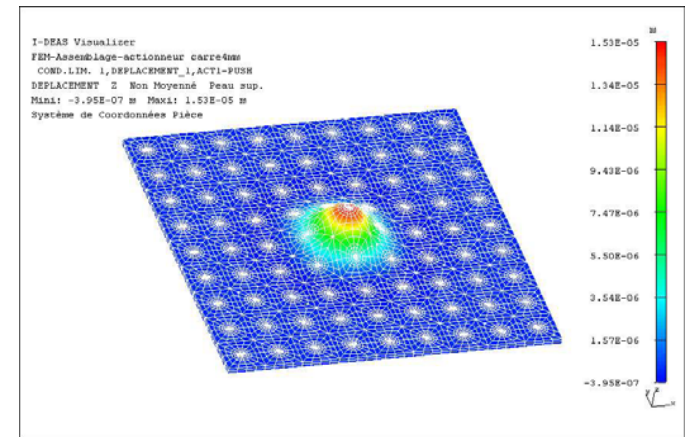
Fonctions de structure des fluctuations d'indice



Fonctions d'influence « génériques »



Double Gaussian
+ stretch to obtain desired coupling



Best fit of defocus

Analyse du fitting

- Approche Fourier : basée sur Shannon, pas explicitement de IF

-> correction parfaite région $\{-f_c < f_x < f_c ; -f_c < f_y < f_c\}$ with $f_c=1/(2 \cdot \text{pitch})$

- Carré/pitch : $\sigma_{\text{fitting}}^2 = 0.232 (\text{pitch}/\text{ro})^{5/3}$
- Disque de rayon f_c : $\sigma_{\text{fitting}}^2 = 0.023 \frac{3}{5} 2 \pi 2^{5/3} (\text{pitch}/\text{ro})^{5/3} = 0.275 (\text{pitch}/\text{ro})^{5/3}$
- Hexagonal/pitch: $\sigma_{\text{fitting}}^2 = 0.200 (\text{pitch}/\text{ro})^{5/3} = 0.225 (\text{pitchsquare} / \text{ro})^{5/3}$

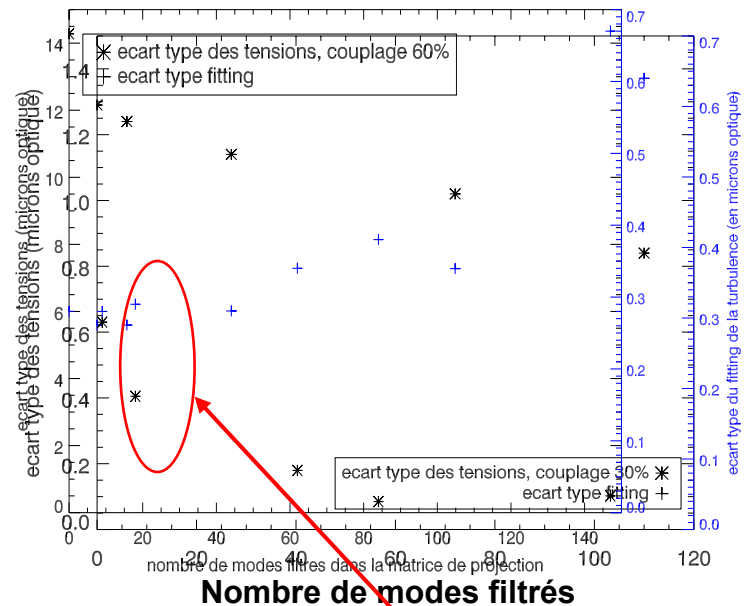
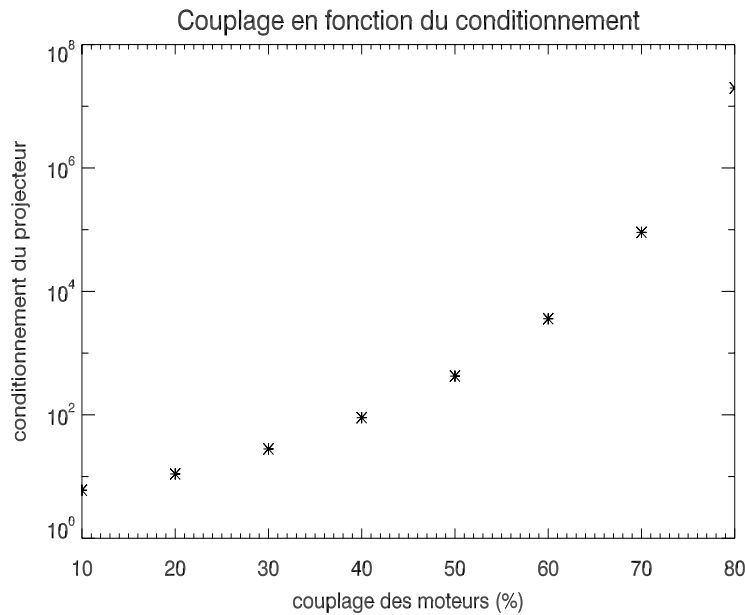
		objective 145 nm rms	goal 110 nm rms
square geometry, based on: $\sigma_{\text{fitting}}^2 = 0.232 (\text{pitch}/\text{ro})^{5/3}$	pitch [m] in 42m pupil	0.6000	0.4286
	Nactlin	71	99
	Nact	3850	7545
hexagonal geometry, based on: $\sigma_{\text{fitting}}^2 = 0.200 (\text{pitch}/\text{ro})^{5/3}$	pitch [m] in 42m pupil	0.6563	0.4719
	Nactlin	65	90
	Nact	3715	7185

Table 2: number of actuators to meet the fitting specification in the median seeing case based on Fourier analytical expressions: Nactlin is the number of "linear" actuators sampling the telescope pupil in the principal axis ($\{0^\circ$ alias x and 90° alias $y\}$ for square geometry, $\{x, 60^\circ$ and $120^\circ\}$ for hexagonal geometry), Nact is an approximation of the total number of actuators inside the telescope pupil

Influence du couplage mécanique

- Calcul du projecteur $(IM^T IM)^{-1}IM^T$ par décomposition en valeurs singulières et inversion
=> Troncature des certains modes

Nombres d'actionneurs : 15x15 soit 177 utiles
 R0 = 0.05 m @ 500nm
 D = 8 m
 Fonction d'influence du DM :
 gaussienne de couplage variable : 30% ou 60%
 Phase turbulente soustraite du piston et des tip tilts L0 = 90m



⇒ Couplage faible : pas de troncature

⇒ Couplage fort : troncature, combien de modes ?

Filtrage de 20 modes
pour le couplage de
60%

Analyse des « strokes »

- **Grand principe : phicorr ~ phiturb**

donc stroke/interstroke en surface miroir tj smooth

=> uniquement guidée par condition de turbulence Lo/ro (+ aberrations / perturbations télescope)

- **Stroke/interstroke en u très dépendante du couplage mécanique**

[voir de dynamique temporelle DM si on tente de l'inverser dans la loi de commande]

si contrainte => compromis amplitude commande / fitting

- Pour couplage autour de 30% synergie entre actuateurs voisins, stroke en u (normalisés) qqes fois inférieures à stroke en phitur/phicorr

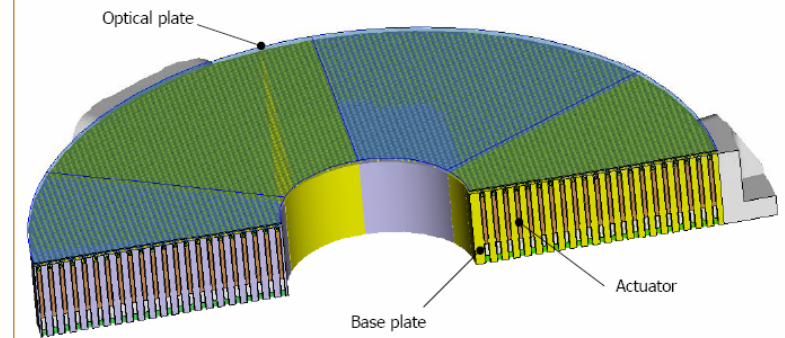
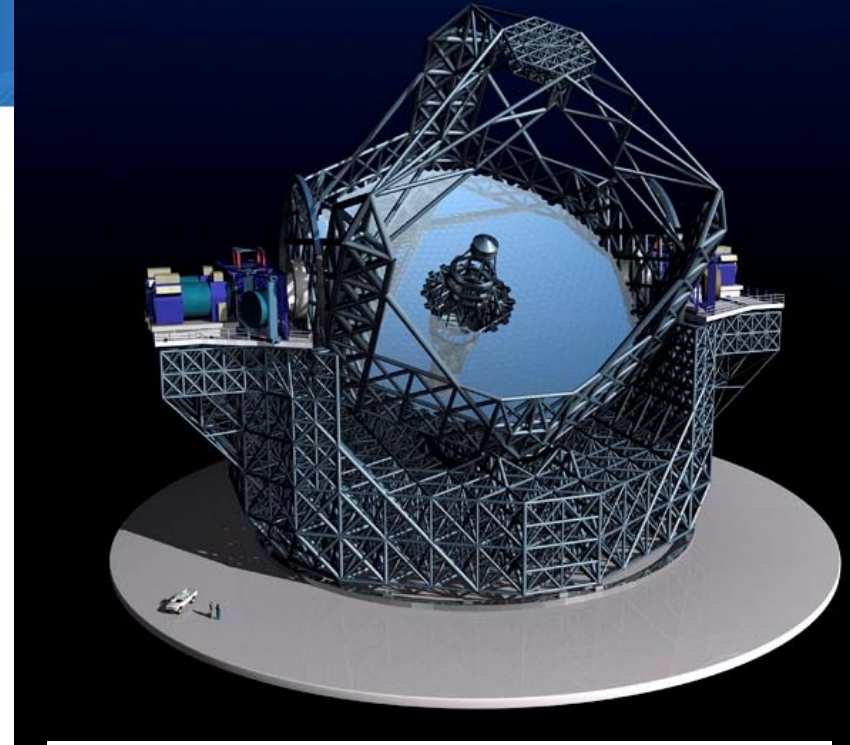
- **Dimensionnement DM et gestion des limitations dans la loi de commande dépend *in fine* des contraintes constructeur:**

- Limitation en stroke/interstroke sur surface miroir phicorr
- Limitation sur stroke/interstroke/puissance sur commande (tensions, courants...)
 $u < u_{max}$, $\Delta t < \Delta t_{max}$; somme des u^2 inférieur à P_{max} ...
- Compromis stroke / facteur de conversion volt ou courant versus μm / dynamique temporelle

Un exemple : l'E-ELT

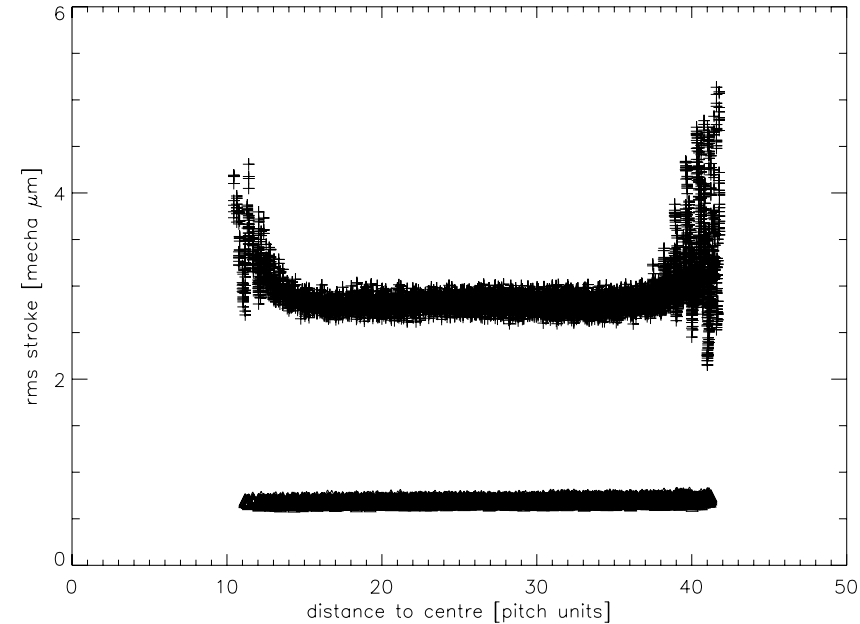
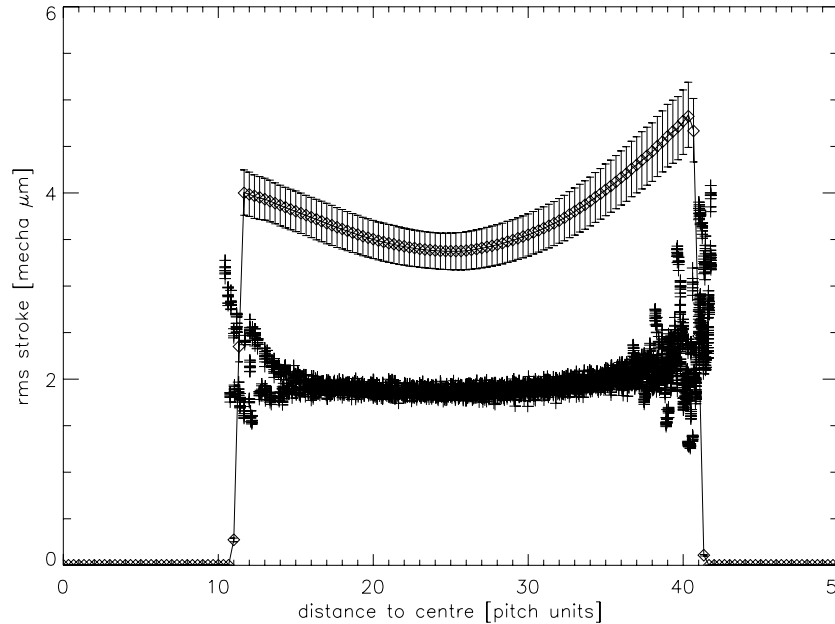
Telescope adaptatif

- M4 adaptatif
 - 2.5 m
 - > 5000 actionneurs
 - BP > 500 Hz
- Phase B concurrentielle
 - 2 consortia
 - ⇒ Etude de faisabilité
 - ⇒ Design
 - ⇒ Demonstration
- Consortium CILAS
- Participation PHASE
 - ONERA & GEPI



Preliminary concept based upon SAM technology

Stroke/Interstroke : exemple M4



83x83 ; Couplage : 25 / 35 / 45% ; D=42 ; Lo=100 ; WorstSeeing = 2.5 arcsec seeing

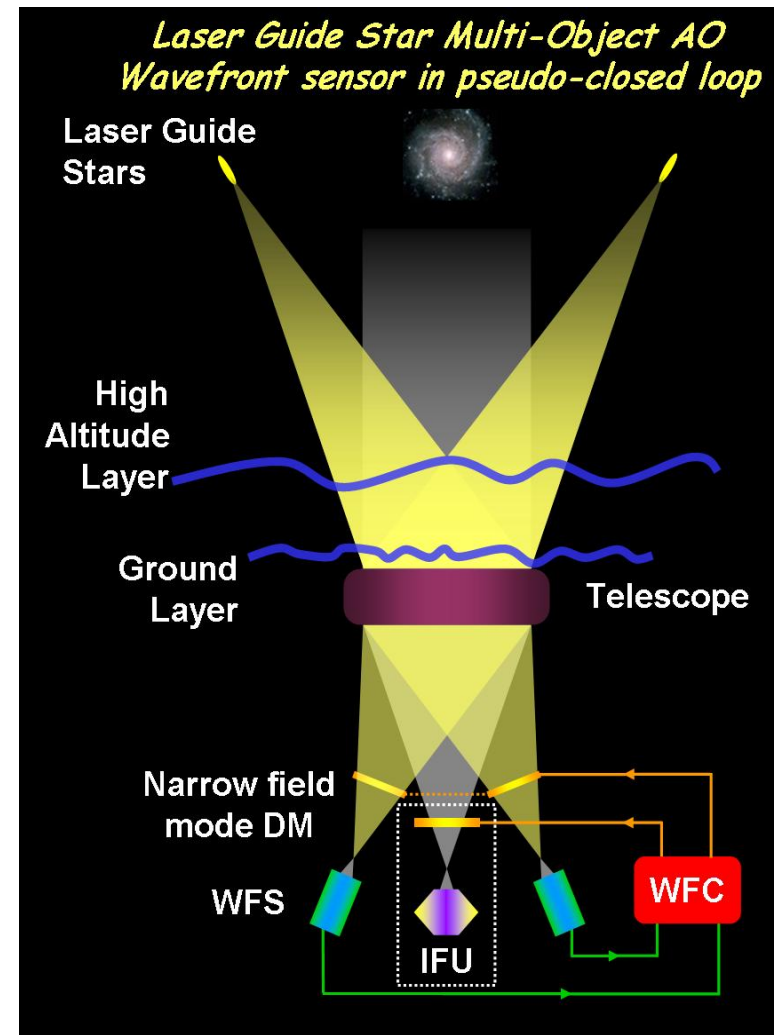
Couplage 35%: rms Interstroke en

- phicorr = 0.70 meca-μm
- phiturb = 0.72 meca-μm
- deduit de Dphikolmo = 0.85 meca-μm

Maximum stroke & saturation

exemple de la MOAO sur E-ELT

- Contexte : instrument EAGLE
- Système d'OA multi-objet
 - ⇒ M4 dans le telescope (couvre tout le champ : 5'x5')
 - ⇒ DMs « distribués » dans l'instrument
- Dimensionnement des DMs ?
- **Contraintes :**
- Nombre d'actionneurs : 110x110
- Dimension : encombrement du plan focal => micro DM
- Stroke ?????



Stroke apres correction par M4

- Atmospheric conditions

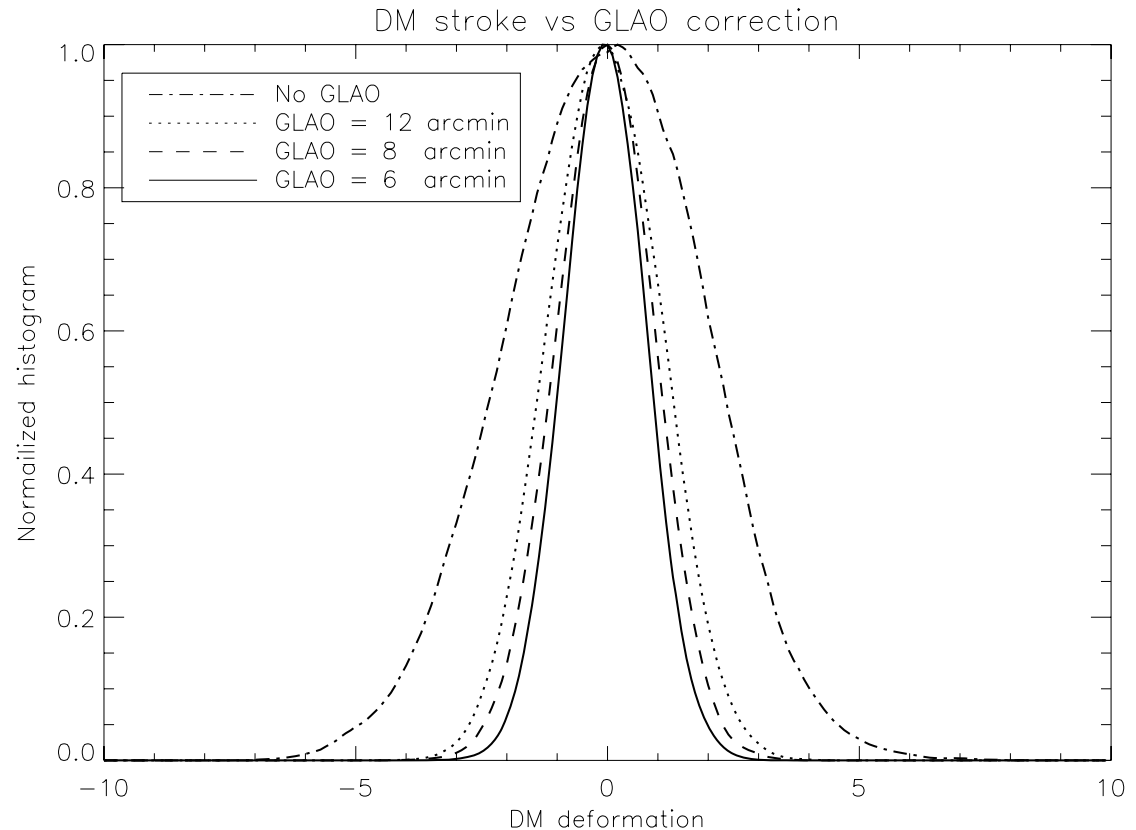
- Seeing = 1.5 arcsec
- $L_0 = 50$ m

- M4 :

- 84x84 actuators

- Course micro DM

- No GLAO corr : **14 μ m PV**
- GLAO 6 arcmin : **5 μ m PV**
- GLAO 8 arcmin : **6 μ m PV**
- GLAO 12 arcmin : **7 μ m PV**



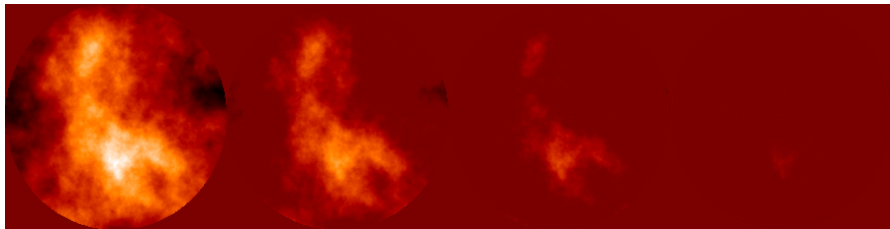
=> Pb potentiel de « saturation »

Saturation effects I

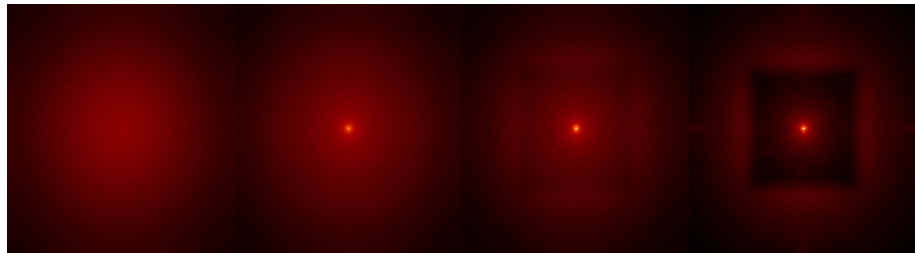
Maximum Stroke = 2.5 * individual stroke
for 30 % coupling factor

Study of saturation effects on individual stroke!

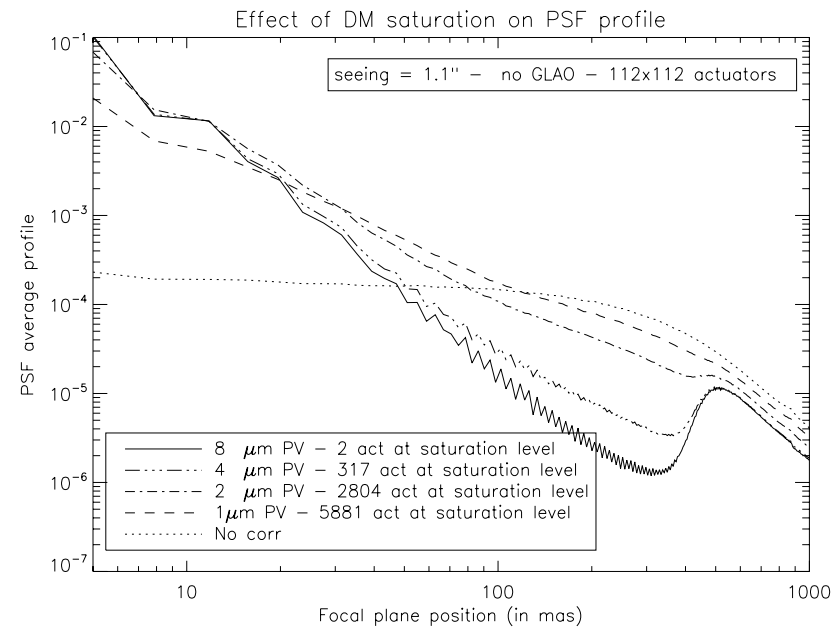
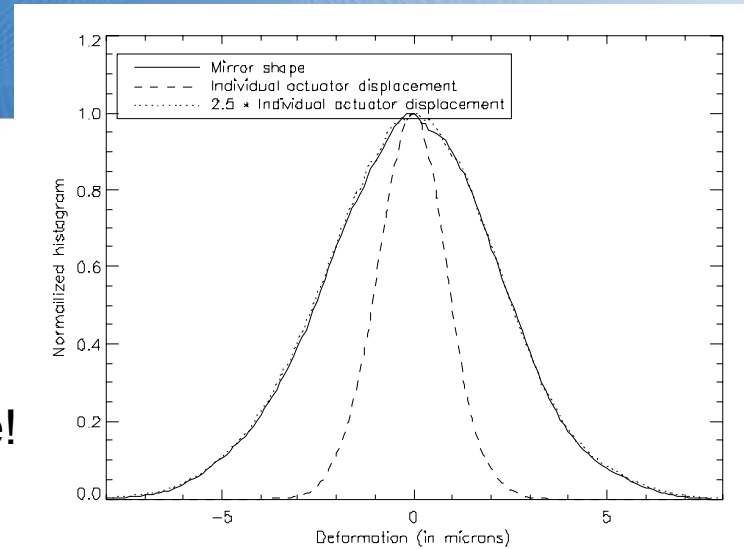
Phase screens



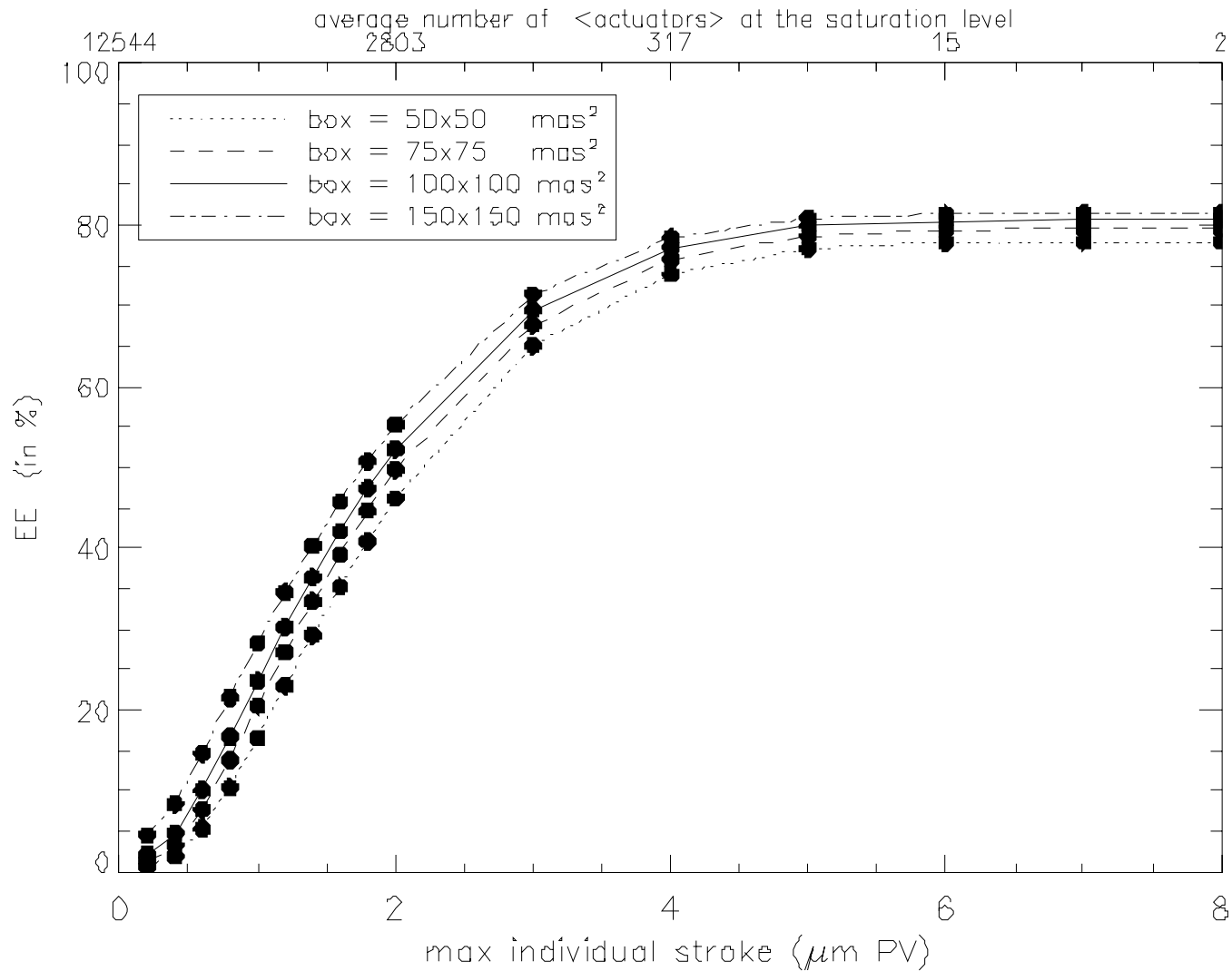
PSF



Turb 1 2 4 μmPV

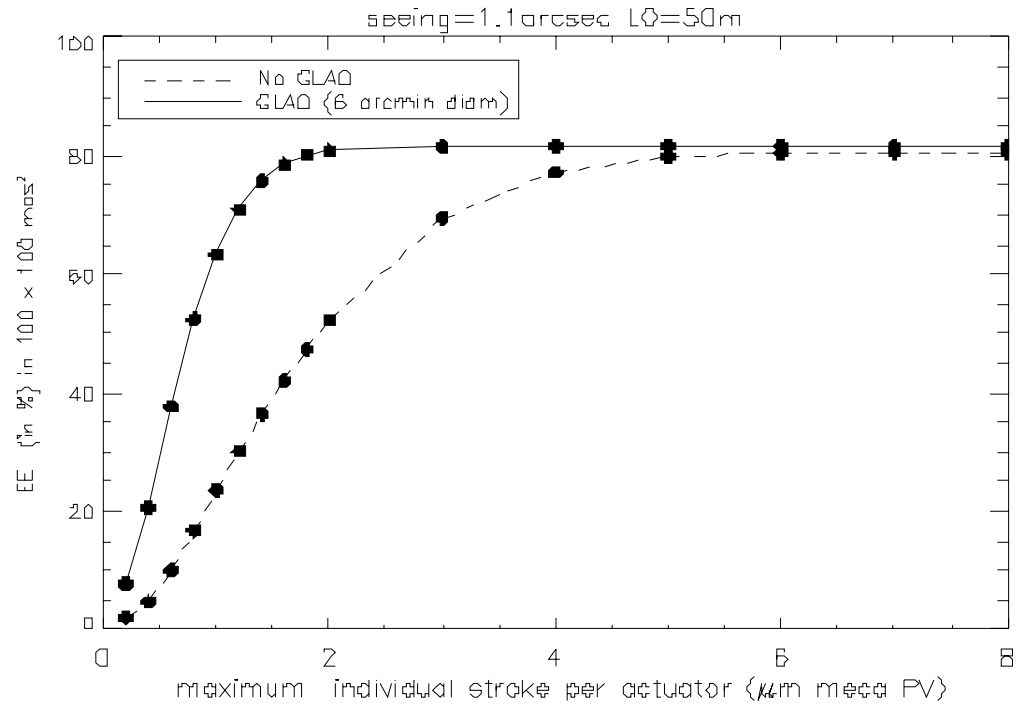
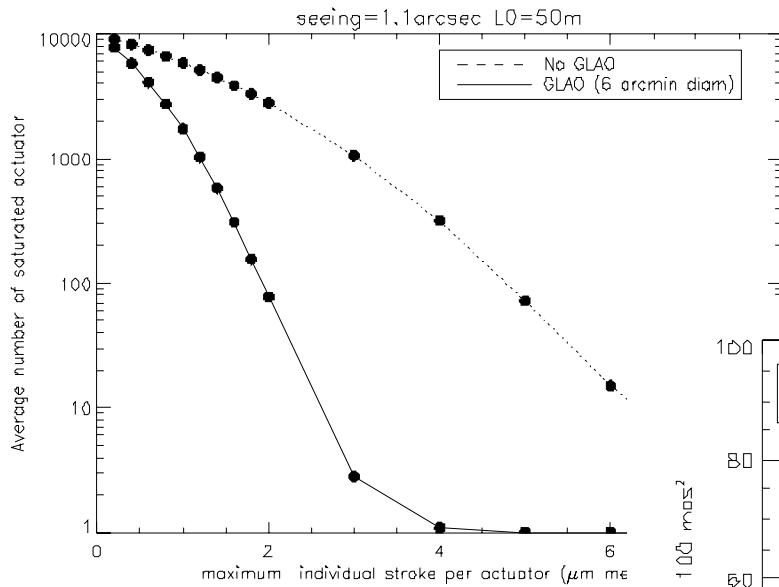


Saturation effects II



Saturation effects III

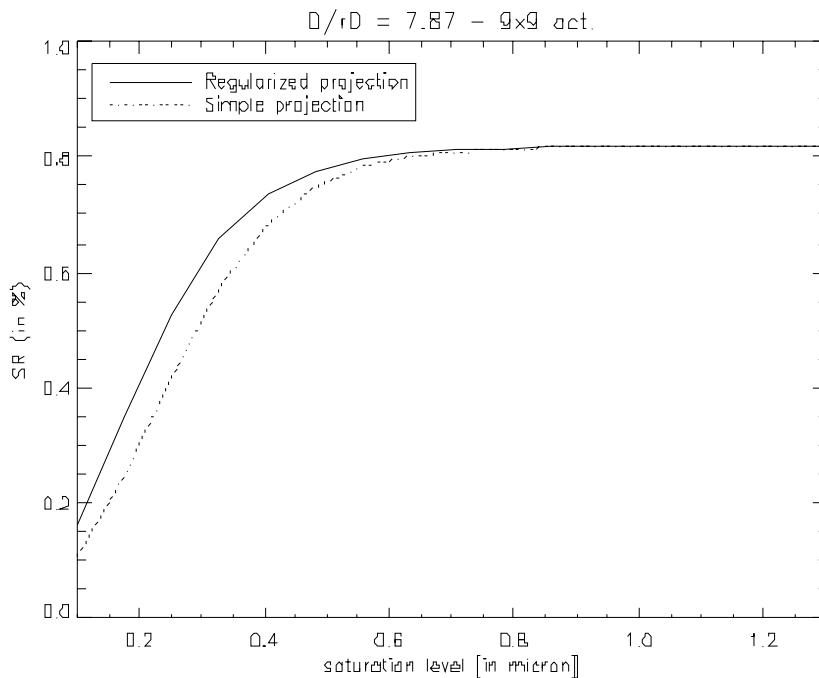
Impact of the first stage of correction using M4



Reduction of saturation effects

Classical projector $P = (M^t M)^{-1} M^t$

Regularized projector $P = (M^t M + R)^{-1} M^t$ with $R = \mu \frac{9}{u_{\max}^2} I$



- Gain of regularized projector
 - Open loop ~ 20 % of stroke reduction
 - Closed loop > 50 %

See Kulcsar & al, L2TI
OSA meeting (Vancouver)

Conclusion et Perspectives

- Impact important du couplage mécanique sur la stroke du MD et la stroke interactionneur
- La spécification d'un MD dépendra fortement de la technologie envisagée et donc des coefficients de couplage entre les actionneurs
- Une analyse statistique de la projection de la phase turbulente sur les fonctions d'influence reste le seul moyen fiable de dimensionner un MD

- Nécessité d'élargir les paramètres de la simulation :
 - fonction d'influence plus élaborées
 - variation des paramètres de la turbulence : $L0$, $r0$...
 - dynamique temporelle
 - gestion des saturations

AO for ELT

Paris 22-26 June 2009

• Topics

- High level requirements for AO on ELTs
 - AO systems and instrument concepts
 - Artificial laser guide stars
 - Wavefront sensing
 - Real time control
 - Deformable mirrors
 - Post-processing
 - Pathfinders
-
- Abstract : Nov 08 → Feb 09
 - Inscription : Nov 08 → May 09
 - <http://ao4elt.lesia.obspm.fr/>

FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON
AO FOR ELT
(ADAPTIVE OPTICS FOR EXTREMELY LARGE TELESCOPES)

22-26 JUNE 2009
PARIS

ABSTRACT DUE DATE:
30 JANUARY 2009

<http://cigale.obspm.fr/AO4ELT/>

TOPICS

- * Astrophysic needs and high level requirements for AO on ELTs
- * AO systems and instrumental concepts
- * Artificial Laser Guide stars
- * Wave Front Sensing
- * Control and Command
- * Deformable mirrors
- * Post processing
- * Pathfinders

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

CHASE
National Centre for High Angular Resolution Science

l'Observatoire de Paris

PARIS DIDEROT

OS
OBSERVATOIRE DE PARIS