

# Systèmes d'optique adaptative

## Modélisation et commande

ES210 – ENSTA 2A – 2023

Caroline Kulcsár

Équipe Optique Adaptative, Laboratoire Charles Fabry

CNRS - Institut d'Optique Graduate School

### Remerciements

Ce cours s'appuie sur plus de 20 ans de recherche et d'interactions avec en particulier

Henri-François Raynaud (IOGS)

Jean-Marc Conan (Onera-DOTA-HRA)

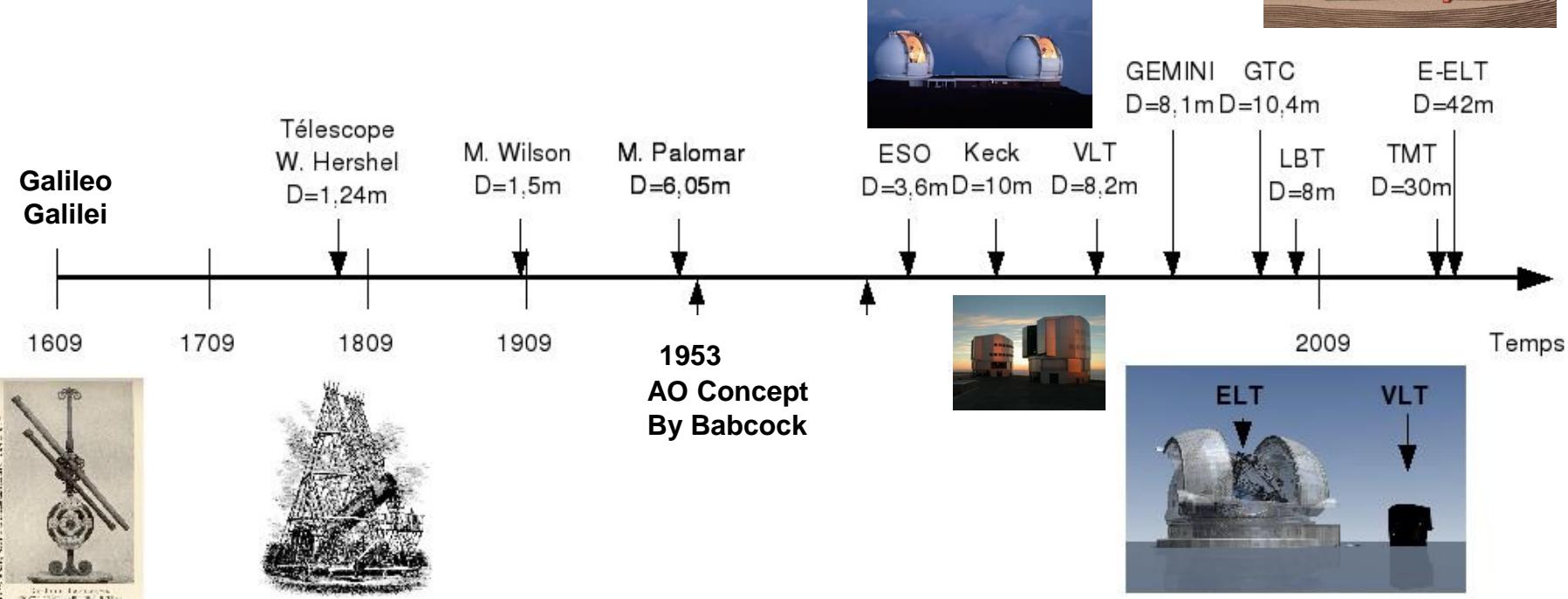
Merci à nos stagiaires, thésard·es, post-docs !

# Plan du cours

- I. Principe de l'optique adaptative
- II. La commande des systèmes d'OA
  - 1. Commande standard à action intégrale
  - 2. Commande optimale à variance minimale
- III. Modélisation pour la commande en astronomie
- IV. Résultats sur le ciel
- V. Quelques enjeux et autres applications

# 4 siècles en instrumentation astro

- De quelques centimètres en 1609...  
**...à 40 mètres... dans 10 ans !**



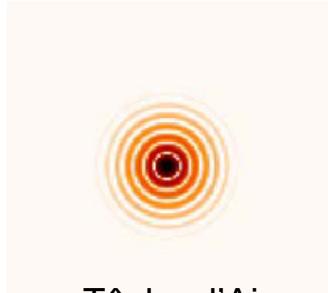
# Extremely Large Telescopes are BIG !



European ELT  
Telescope 39 m  
798 segments (1.45m) à cophaser  
Jusqu'à 6 étoiles guide Laser  
Un MD de 2.5 m avec ~ 8000 actionneurs  
(2 mm d'épaisseur)

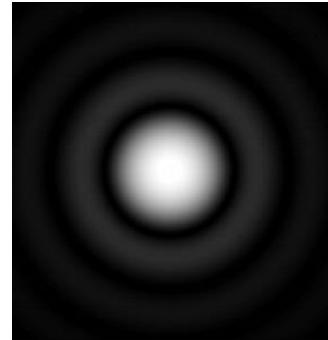
# Notion de résolution angulaire

- Sans turbulence : images limitées par la diffraction



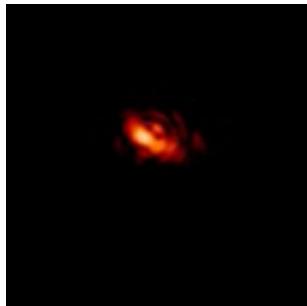
$$\propto \lambda/D$$

Tâche d'Airy  
D : diamètre de l'instrument

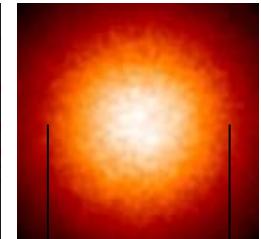
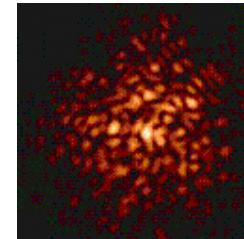


- Et en présence de turbulence ?

$\propto \lambda/r_0$  avec turbulence en longue pose

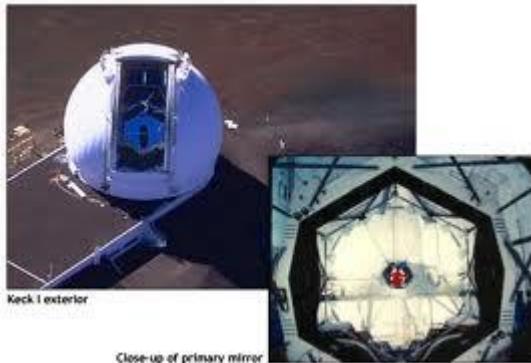


$r_0$  : Fried parameter  
Valeurs typiques :  
~20 cm (IR)  
~10 cm (visible)



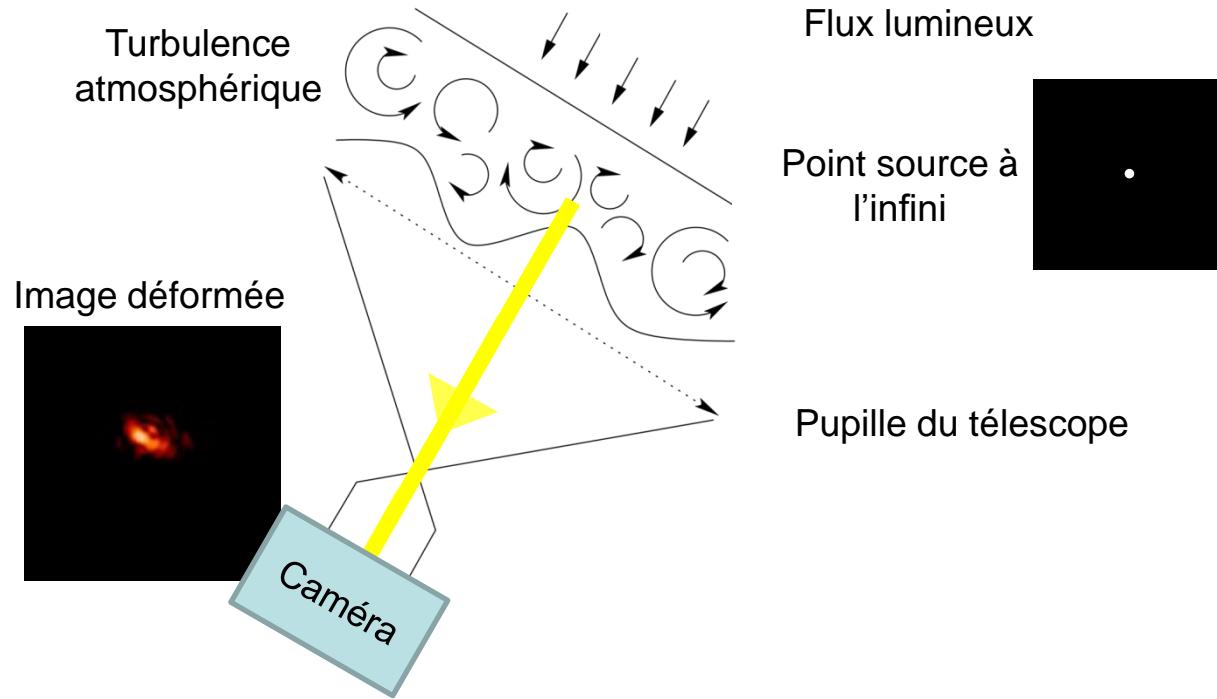
$$\propto \lambda/r_0$$

- Et donc...
  - ▶ Un télescope de 10 m = même résolution angulaire en infra-rouge qu'un télescope de 60 cm ! 1 arcsec au lieu de 10 milli-arcsec
  - ▶  $r_0$  : valeur standard = 10 cm dans le visible (max ~50cm)

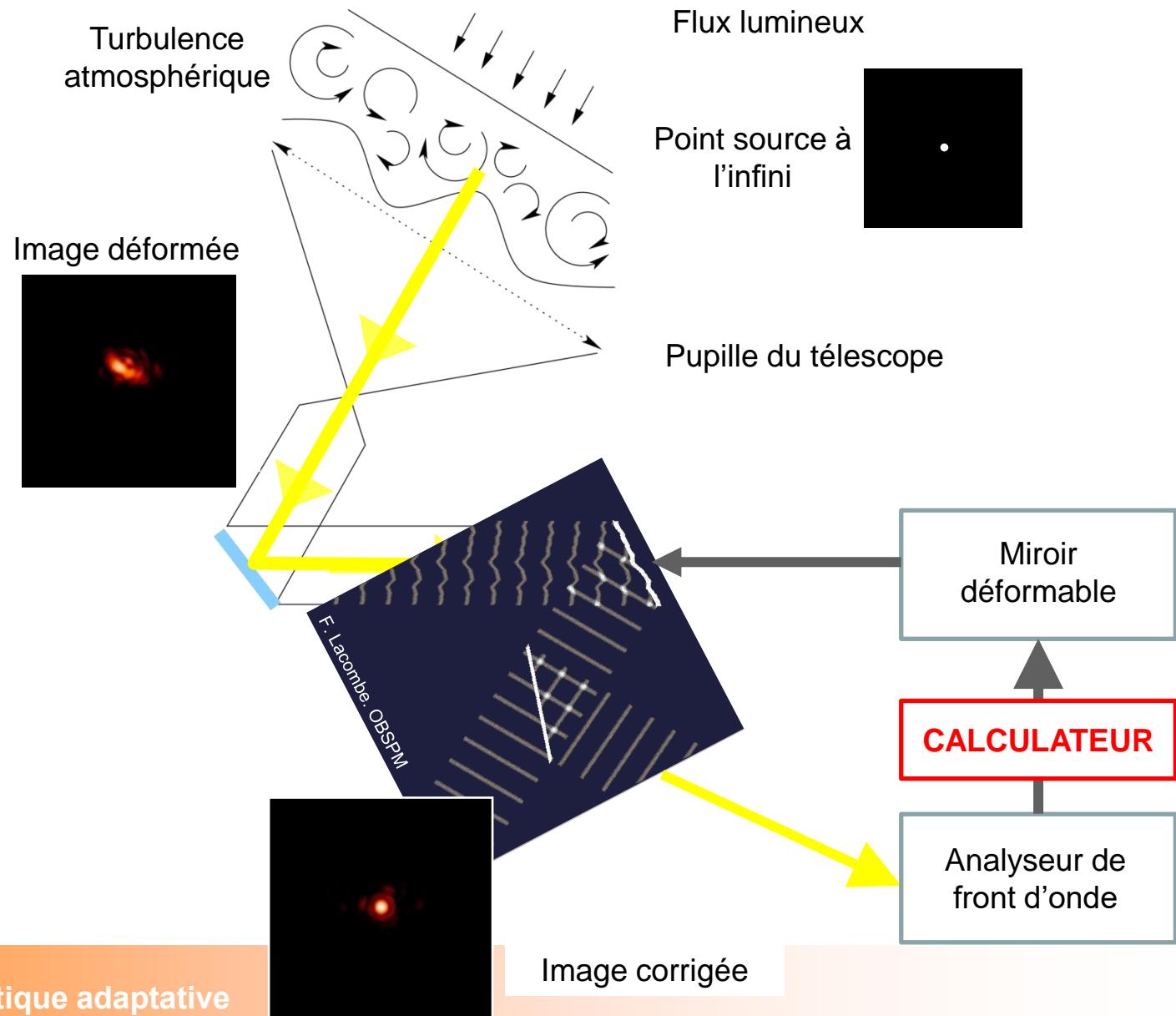


- Bande J entre 1  $\mu\text{m}$  et 1,4  $\mu\text{m}$
- Bande H entre 1,45  $\mu\text{m}$  et 1,8  $\mu\text{m}$
- Bande K entre 2  $\mu\text{m}$  et 2,5  $\mu\text{m}$

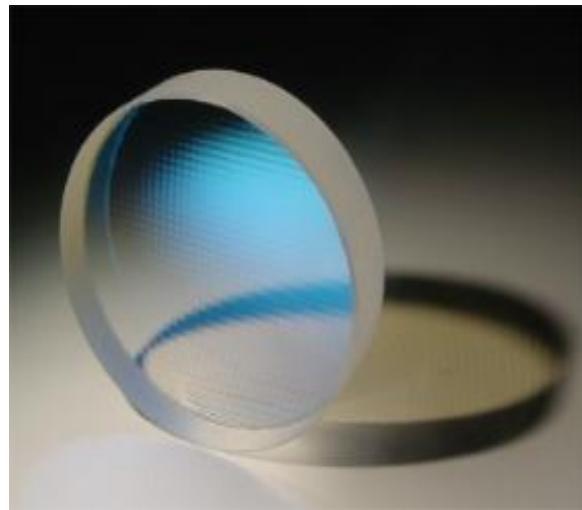
# Principe de l'optique adaptative



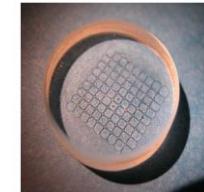
# Principe de l'optique adaptative



# L'analyseur de surface d'onde

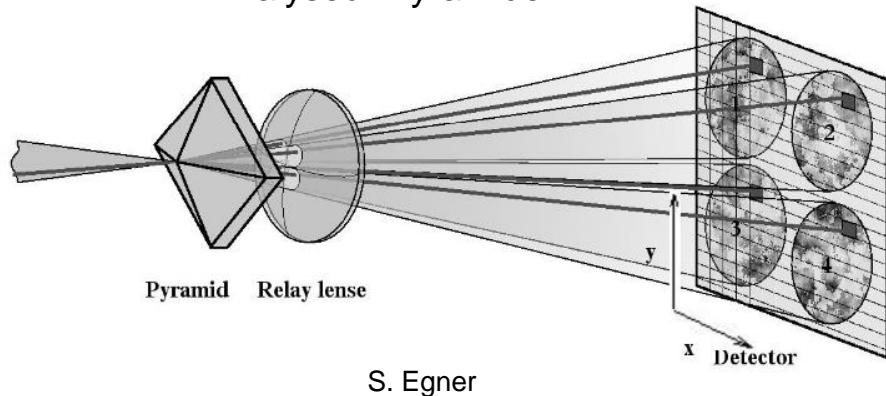


Une matrice de micro-lentilles  
pour un Shack Hartmann (Jenoptik)



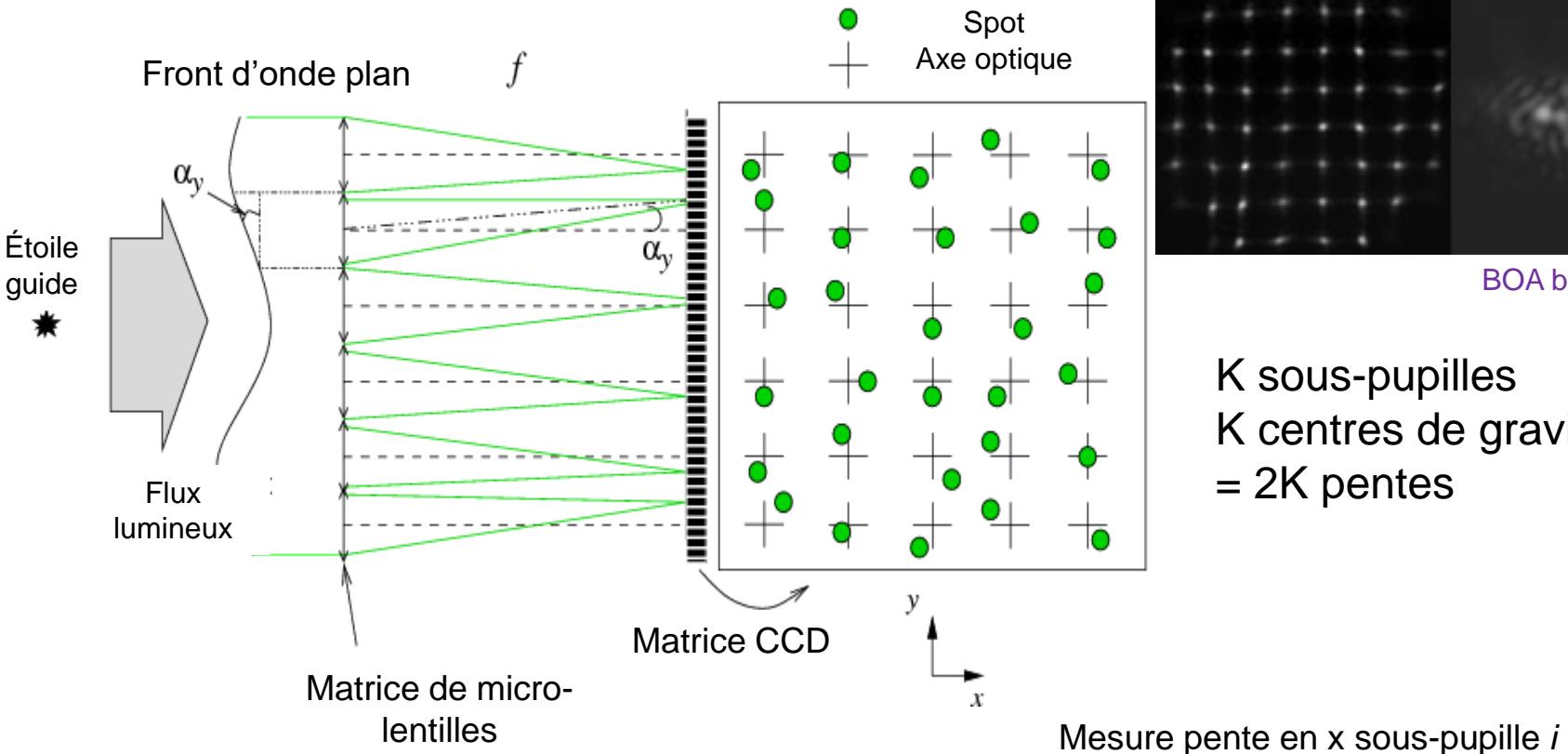
Une matrice de micro-lentilles 7x7  
pour un Shack Hartmann  
(HOMER, Onera)

## Analyseur Pyramide



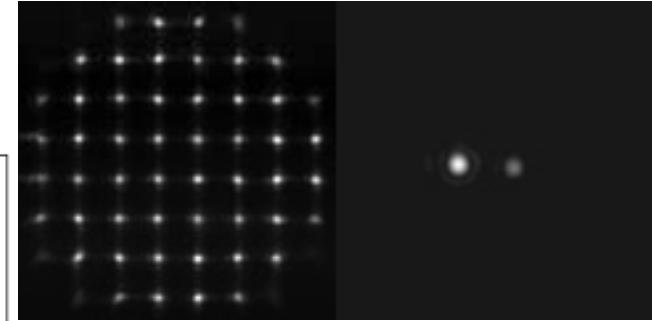
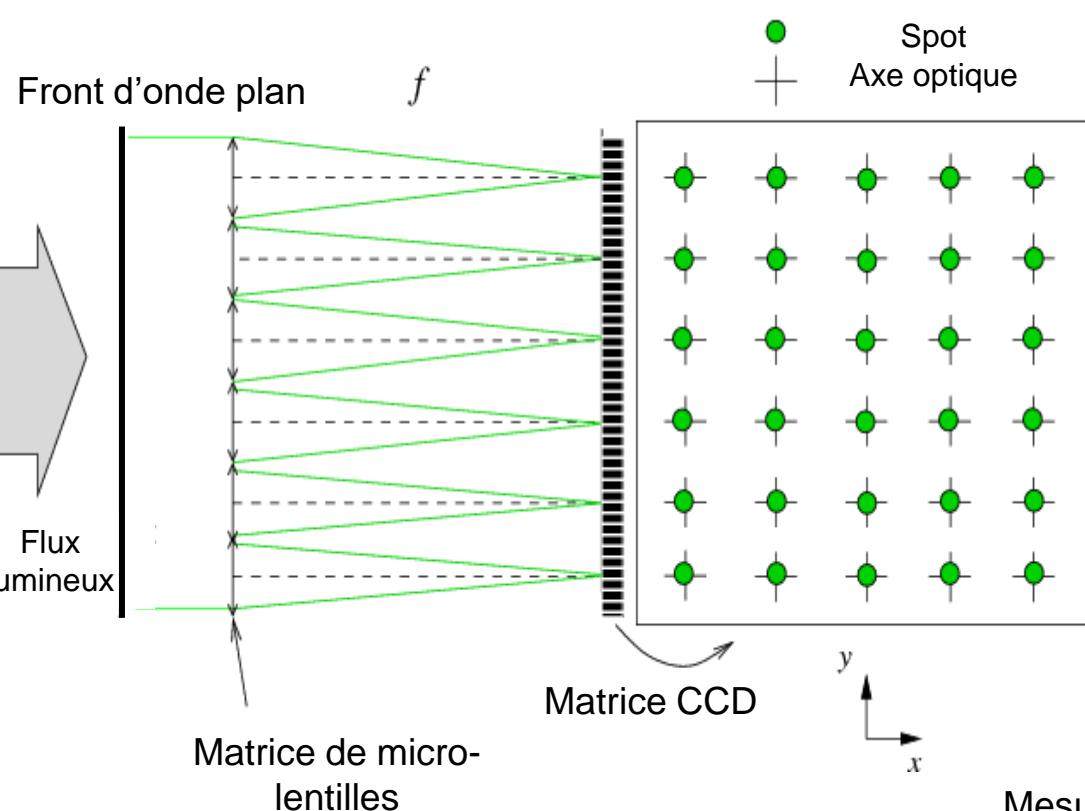
Le prisme (INAF)

# Analyseur de type Shack-Hartmann



$$\frac{\lambda f}{2\pi S_i} \int_{S_i} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} dx dy + \text{bruit}$$

# Analyseur de type Shack-Hartmann



BOA bench, C. Petit

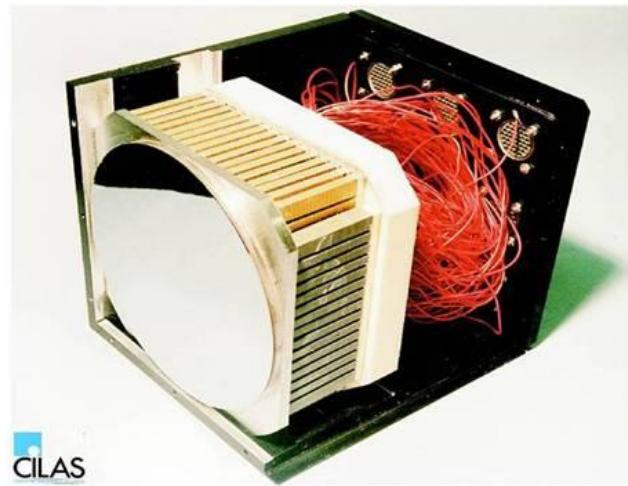
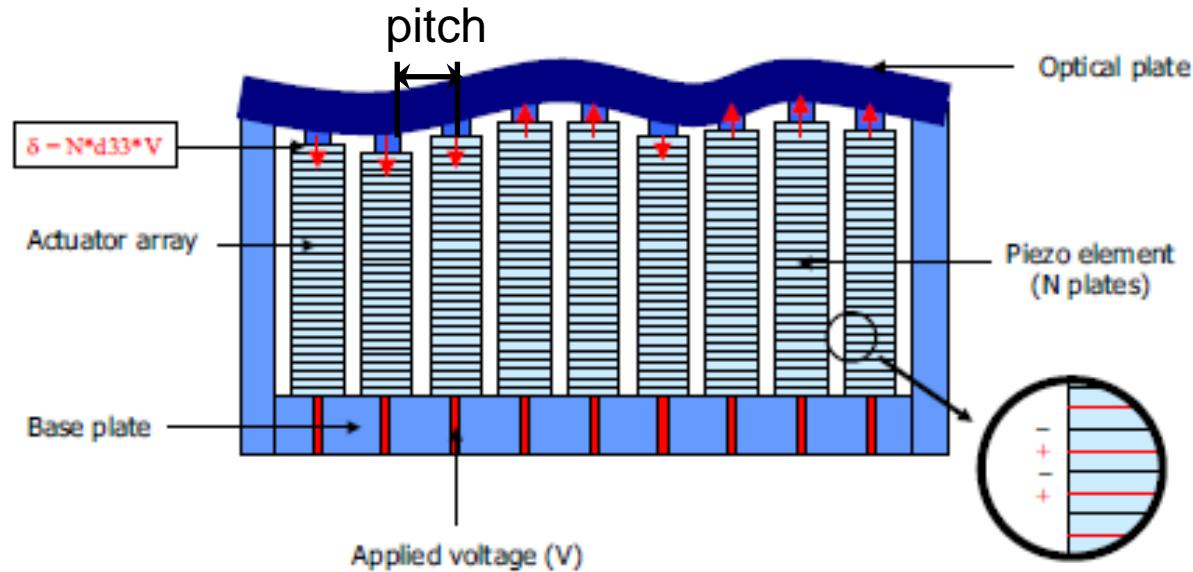
K sous-pupilles  
K centres de gravité  
= 2K pentes

→ Opérateur linéaire  $D = \text{matrice ASO}$   
 $y = D\varphi$

$$\frac{\lambda f}{2\pi S_i} \int_{S_i} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} dx dy + \text{bruit}$$

# Le miroir déformable (piezo)

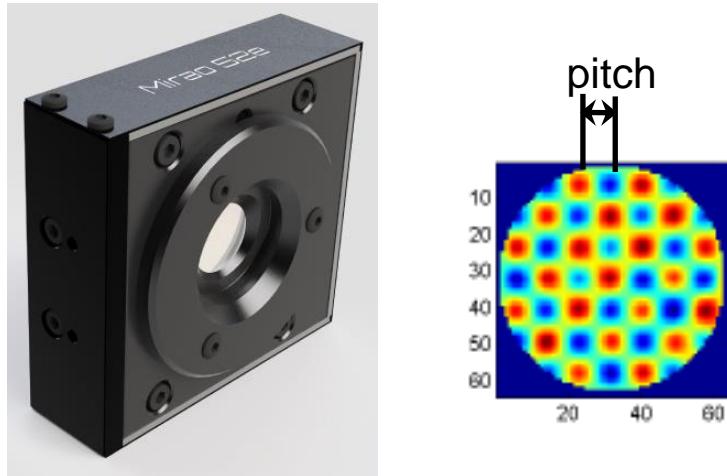
- Fine surface optique recouverte d'alu (~qques mm)
- Actionneurs piezo-électriques placés sur une grille, commandés en tension
- Distance inter-actionneurs = pitch



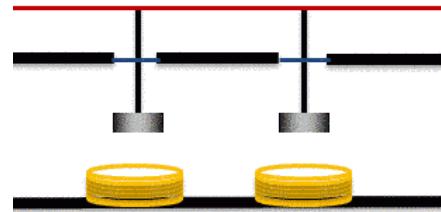
Diamètres typiques :  
de ~10cm à  
qques dizaines de cm

# Le miroir déformable (magnetique)

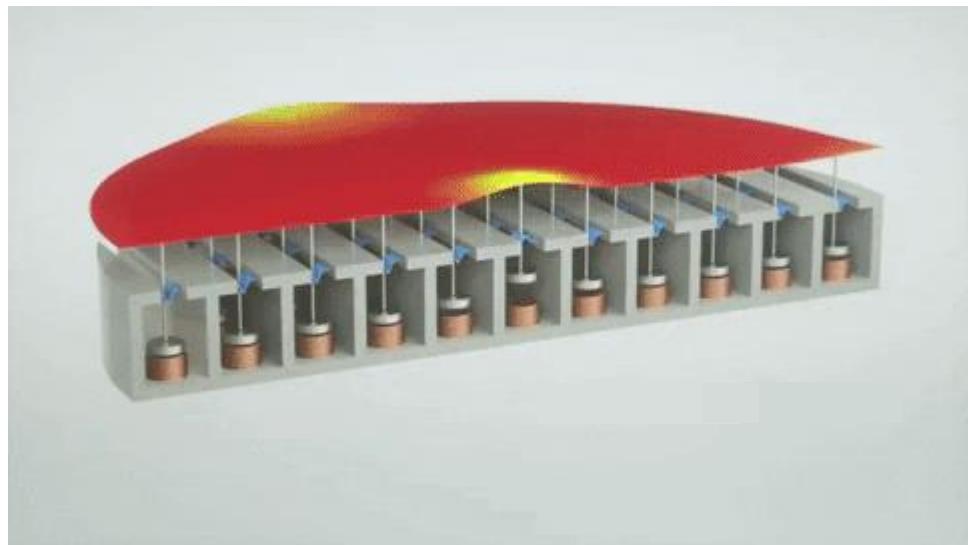
- Fine surface optique recouverte d'alu (~qques mm)
- Actionneurs magnétiques (bobine+aimant) placés sur une grille, commandés en tension
- Distance inter-actionneurs = pitch



Diamètres typiques : qques cm



Crédits : ALPAO



# Miroir Déformable

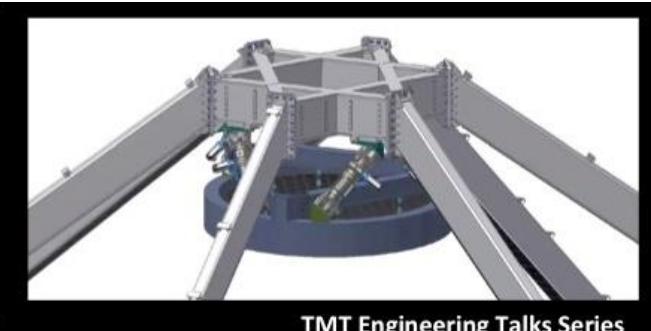
- Peut être immense!

TMT Adaptive secondary mirror

ADOPTICA

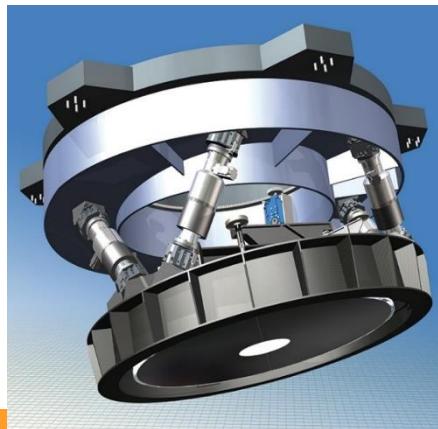
(Micogate Engineering and  
A.D.S. international)

~3.2m, miroir segmenté  
3828 actionneurs à bobine



TMT Engineering Talks Series

ELT : Miroir déformable M4 de 2.4m  
5316 actionneurs à bobine sans contact

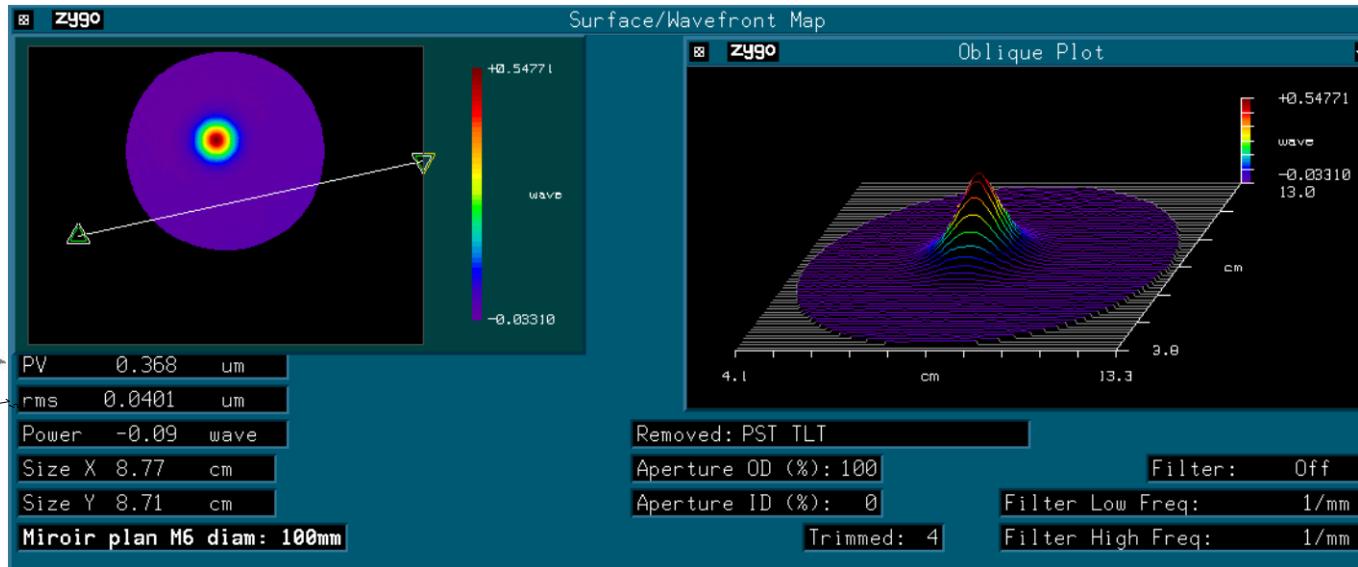
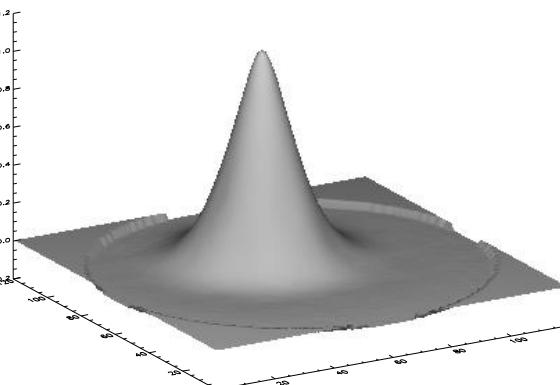


VLT deformable secondary mirror  
Micogate: 1.12m, 1170 actionneurs



# Le miroir déformable (caractérisation)

- Réponses de chaque actionneur = fonctions d'influence
- Mesurées par un interféromètre ou un analyseur haute résolution



Amplitude (stroke) : quelques microns

Courtesy of J.-M. Conan, Onera

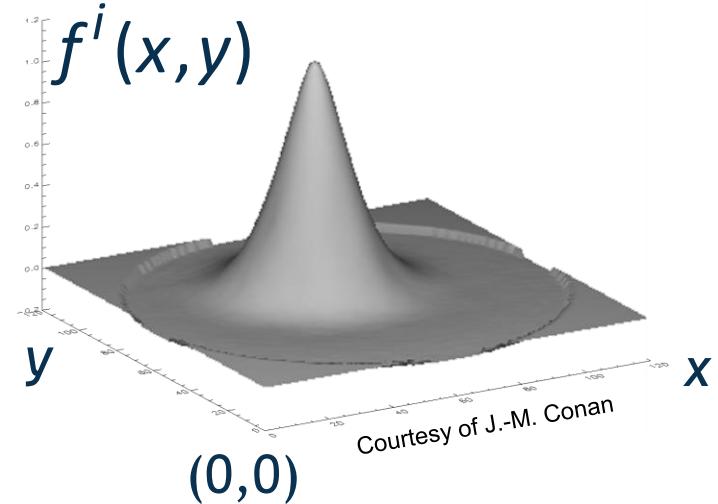
La phase de correction est générée grâce à la déformation de la surface du miroir.

# Miroir déformable

- Réponse linéaire = combinaison linéaire des fonctions d'influence

Fonction d'influence pour l'actionneur n°  $i$

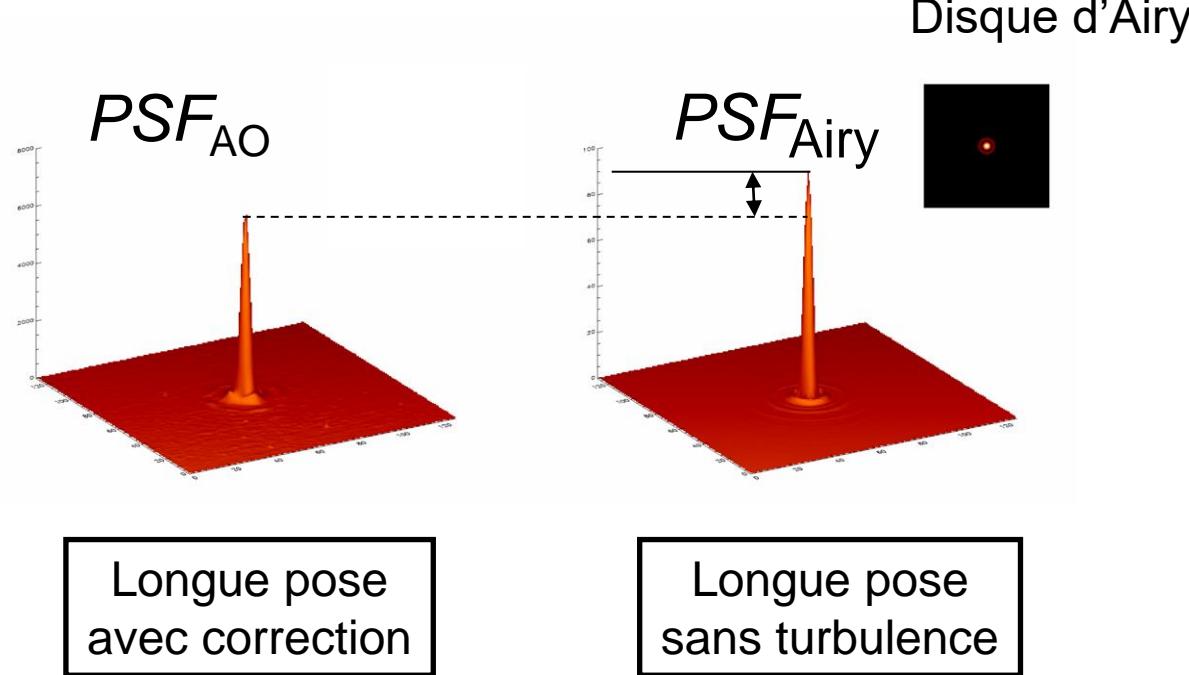
$$\varphi^{\text{cor}}(x, y) = \sum_{i=1}^{n_a} f^i(x, y) u(i)$$



- Opérateur linéaire  $N$  = matrice d'influence
  - Phase de correction :  $\varphi^{\text{cor}} = Nu$

# Critère de qualité d'image

Rapport de Strehl :  $SR = \frac{\max PSF_{AO}}{\max PSF_{Airy}}$



# Critère de qualité d'image

$$\text{Rapport de Strehl : } SR = \frac{\max PSF_{AO}}{\max Airy}$$

Variance de la phase résiduelle

$$\sigma_{\varphi^{\text{res}}}^2 = \text{Var}(\varphi^{\text{res}}) = \left\langle \frac{1}{S} \int (\varphi(r) - \varphi^{\text{cor}}(r))^2 dr \right\rangle_{\varphi}$$

Maximiser le rapport de Strehl

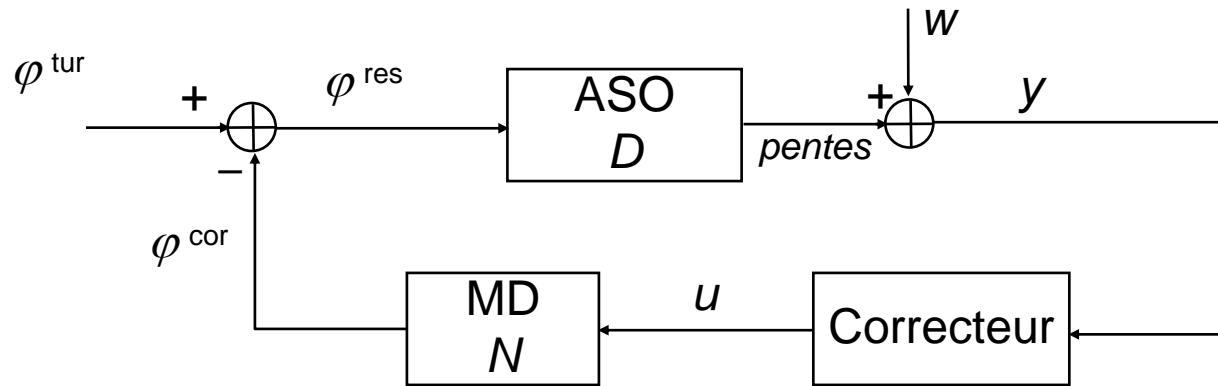
$\leftrightarrow$

Minimiser la variance de phase résiduelle

[Mahajan, JOSA 1982]

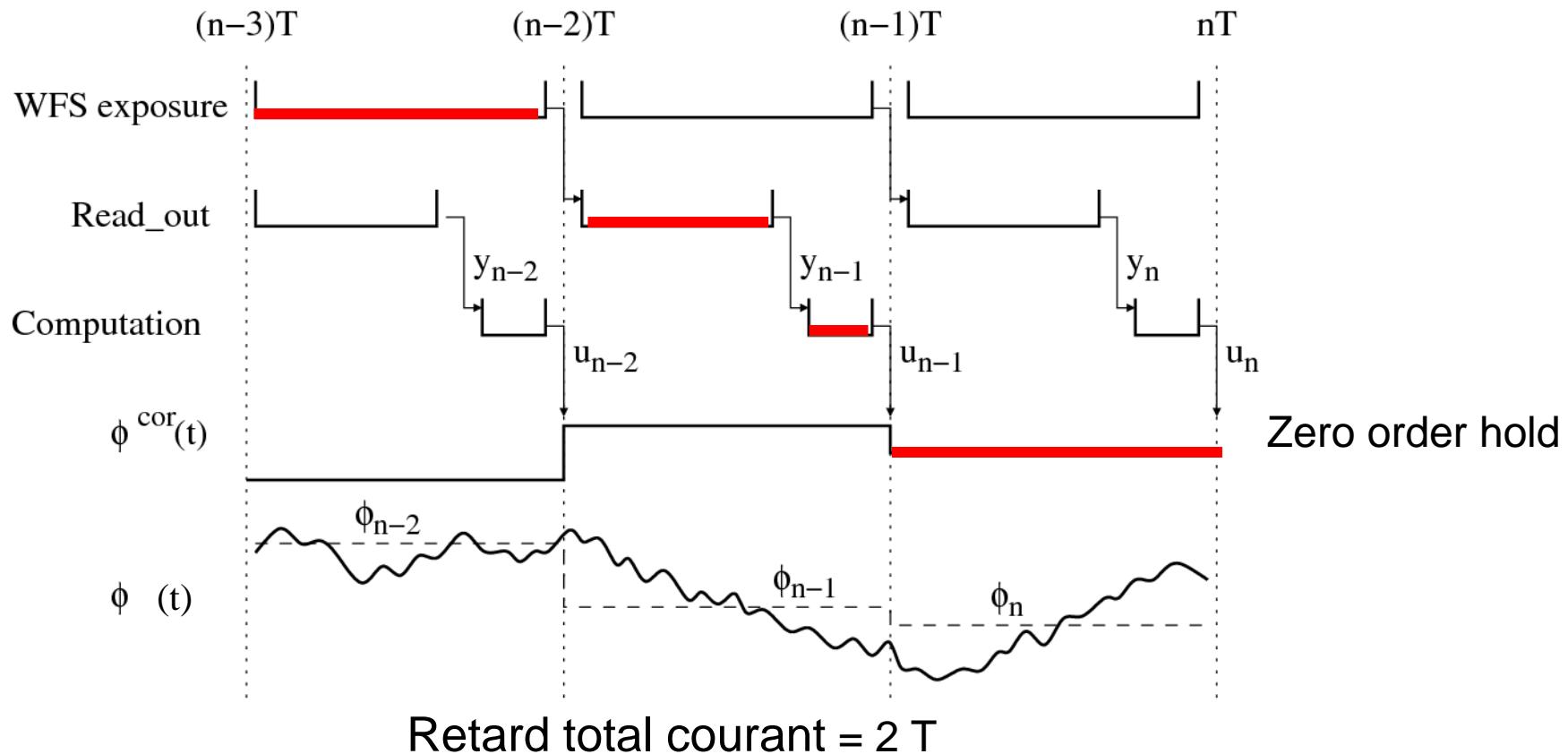
Approximation standard si  
variance petite :  $SR \simeq e^{-\sigma_{\varphi^{\text{res}}}^2}$

[Mahajan, JOSA 1983]



- ASO : Analyseur de surface d'onde
- MD : Miroir déformable
- Correcteur : commande  $u$  appliquée par bloqueur d'ordre zéro  
 $\Rightarrow$  constant sur un intervalle de temps  $T$
- **Système linéaire avec des retards**

- Un chronogramme standard



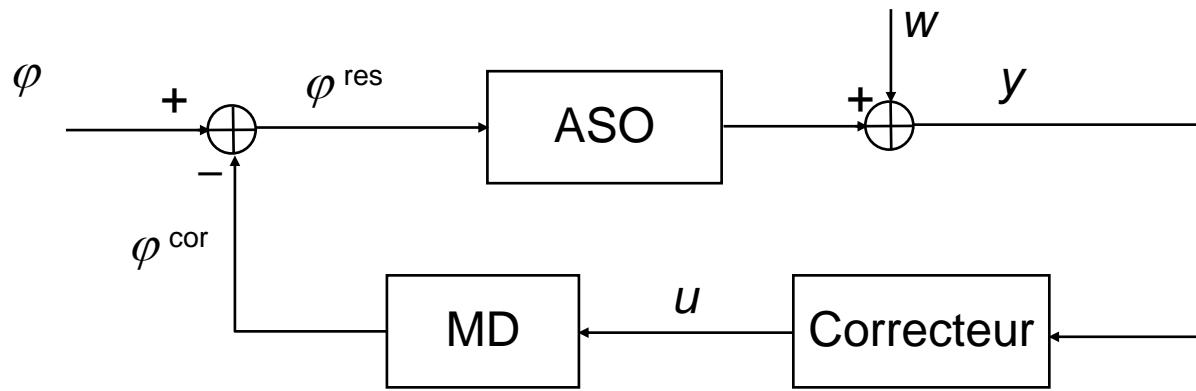
Pas de critère  
Pas de modèle  
 $u_k = u_{k-1} + gM_{\text{com}} y_k$



## Commande à action intégrale

Utilisée sur tous les systèmes d'OA en baseline

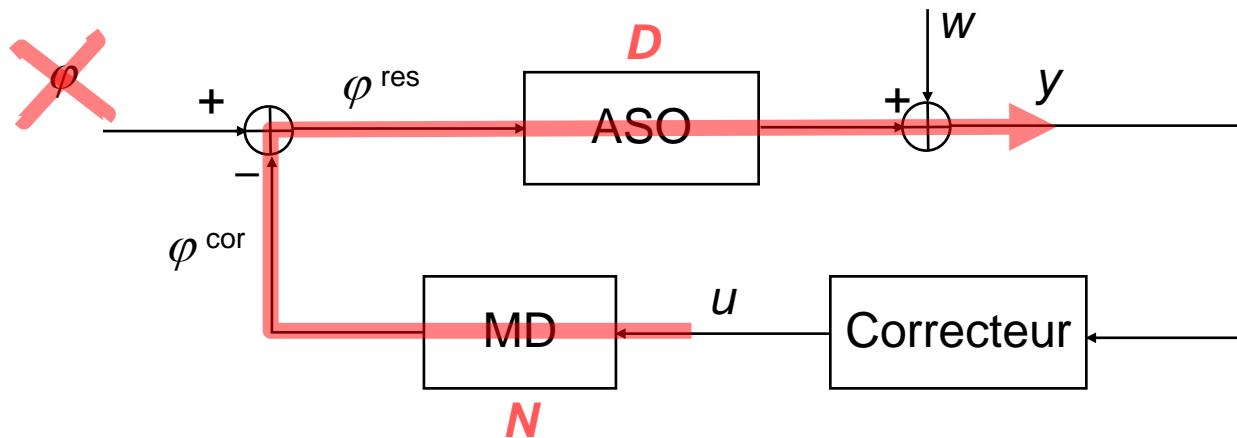
# Commande à action intégrale



- Correcteur : intégrateur = une équation simple

$$u_k = u_{k-1} + gM_{\text{com}}y_k$$

- Un réglage simple



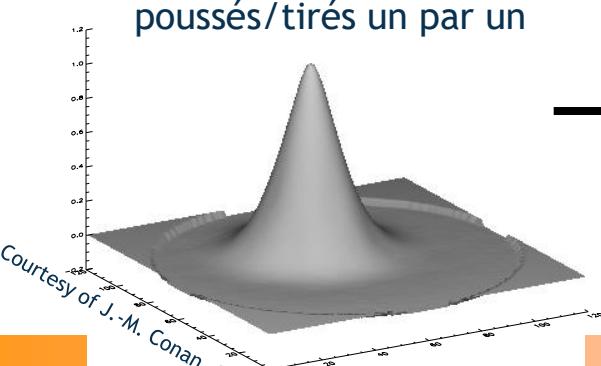
## 1. Mesurer la matrice d'interaction

$$y = M_{\text{int}} u$$

actionneurs

$$M_{\text{int}} = \mathbf{D} \times \mathbf{N}$$

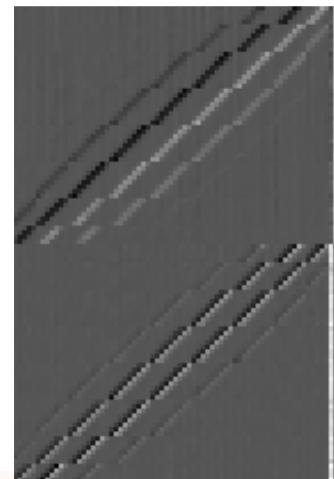
$n_a$  actionneurs  
poussés/tirés un par un

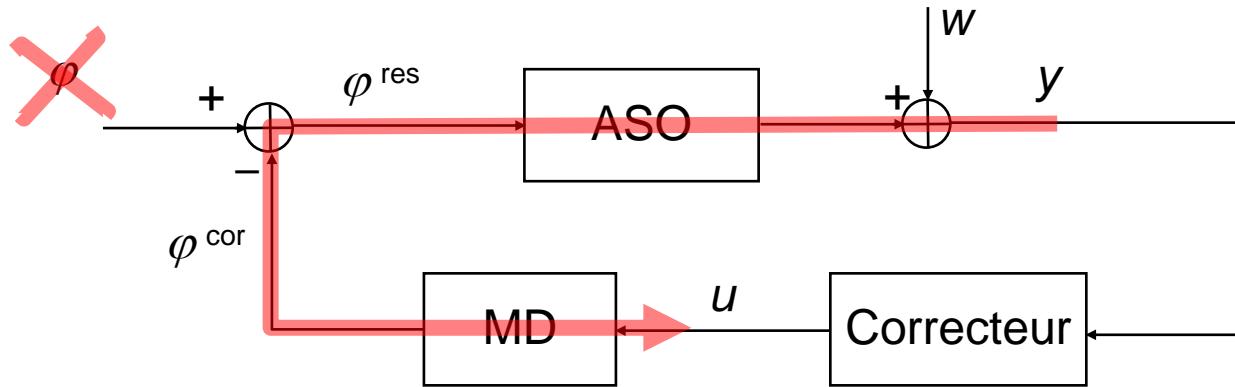


$n_a$  vecteurs de pentes mesurées

$$\underbrace{(y^1, \dots, y^{n_a})}_{\text{Matrice d'interaction } M_{\text{int}}}$$

pentes



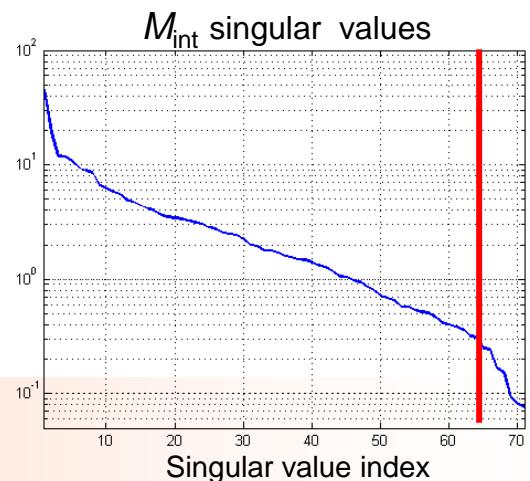


1. Mesurer la matrice d'interaction  $y = M_{\text{int}} u$
2. Calculer la matrice de commande  $u = M_{\text{com}} y \quad M_{\text{com}} = (M_{\text{int}})^+$

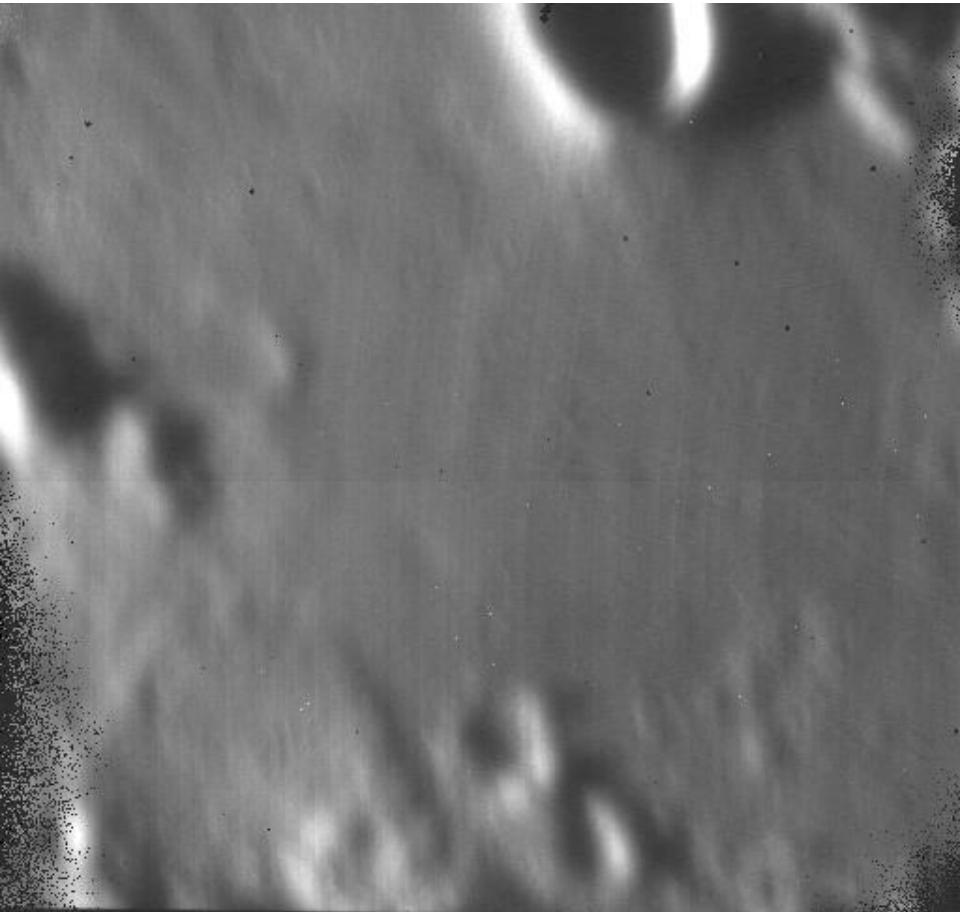
Décomposition en valeurs singulières + troncation

$$M_{\text{int}} = U W V^t, \quad W = \begin{pmatrix} \sigma_1 & & & & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \\ & & \sigma_{n_f} & & \\ 0 & & & & \sigma_{n_a} \end{pmatrix}$$

II. La  $M_{\text{com}} = (M_{\text{int}})_{\text{filt}}^+ = V W_{\text{filt}}^- U^t$



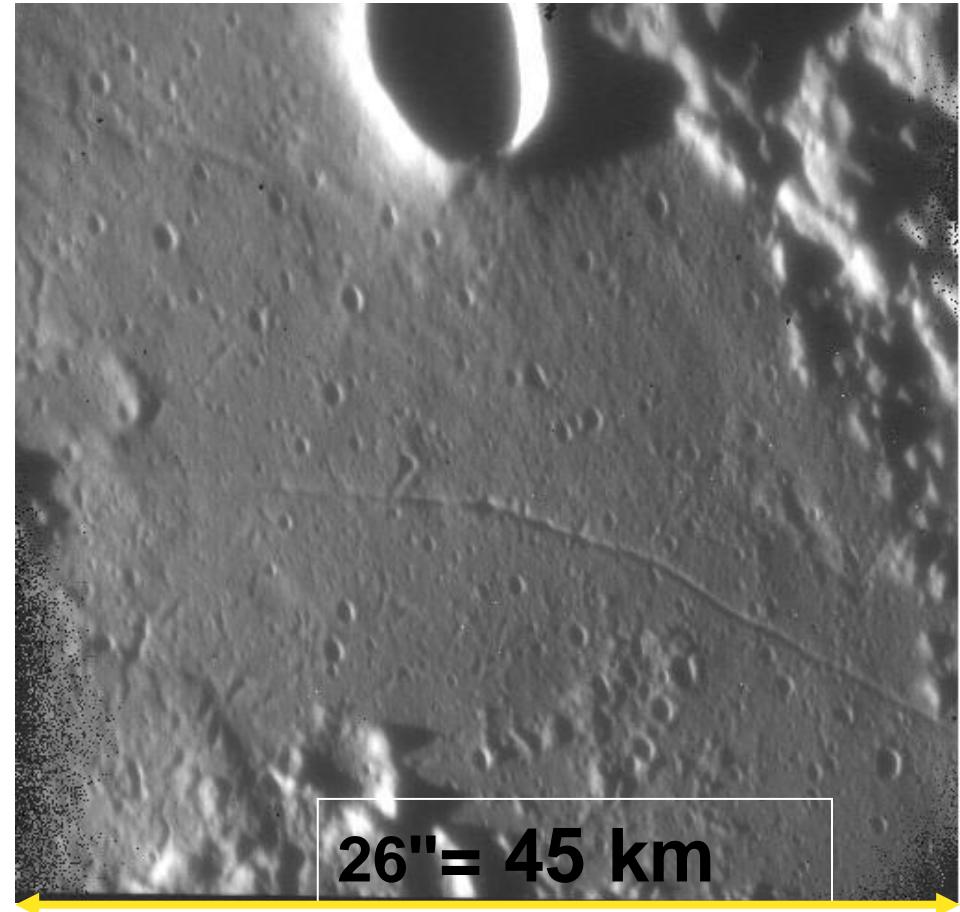
# Que se passe-t-il sur la lune ?



Sans correction par OA

ONERA

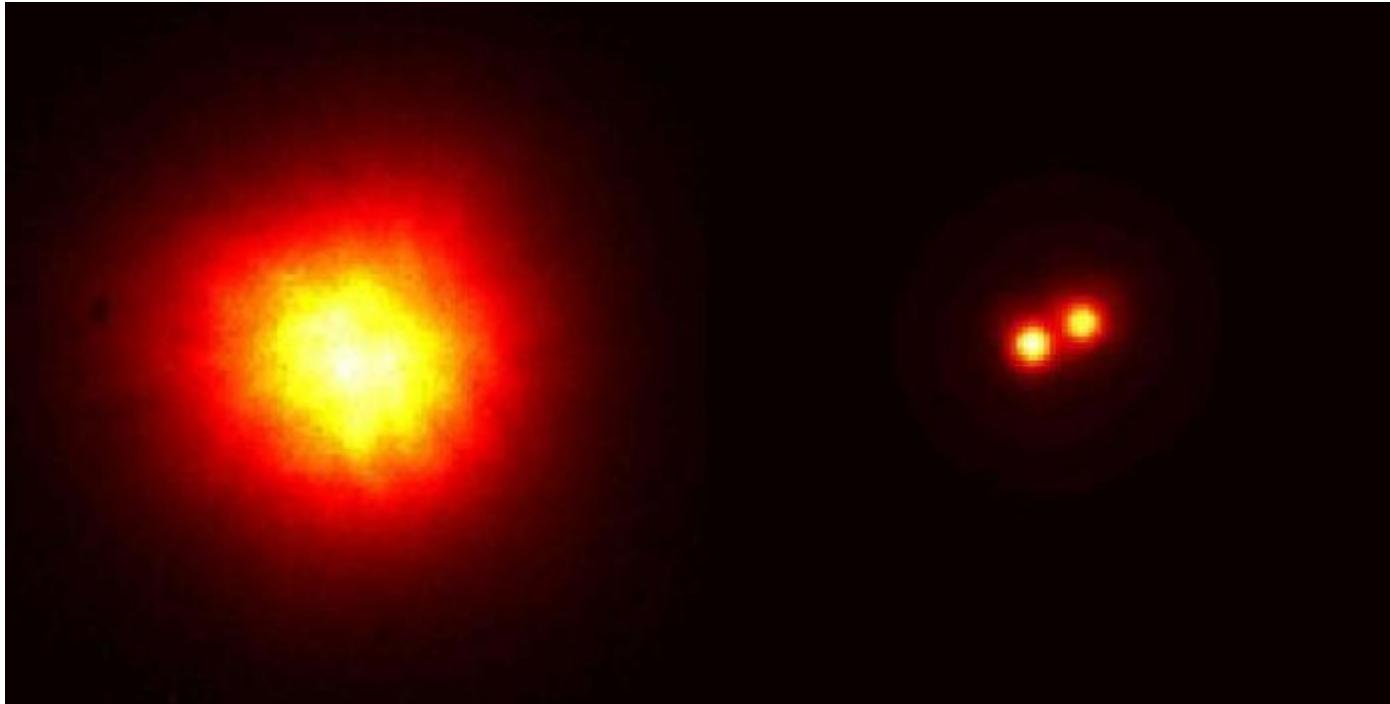
*LAOG ODP*



Avec correction

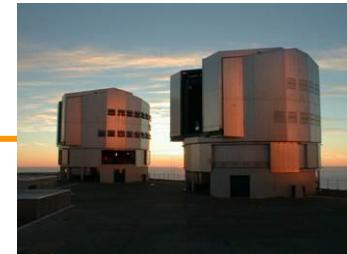
# Et ailleurs ?

- NAOS au VLT



Crédit ESO

# NAOS-CONICA au VLT

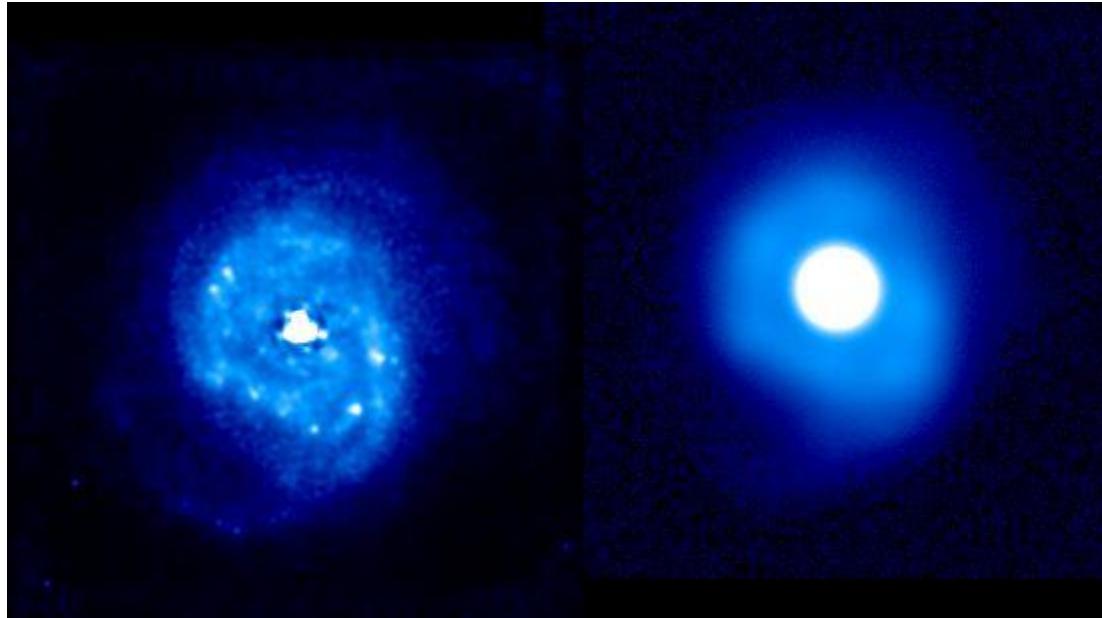


NAOS : système d'OA = 15x15 actionneurs ; fréquence de la boucle 500 Hz

Développé par : ONERA, Grenoble et l'observatoire de Paris sous contrat ESO

CONICA : caméra proche infra-rouge développée par le Max Planck Institute

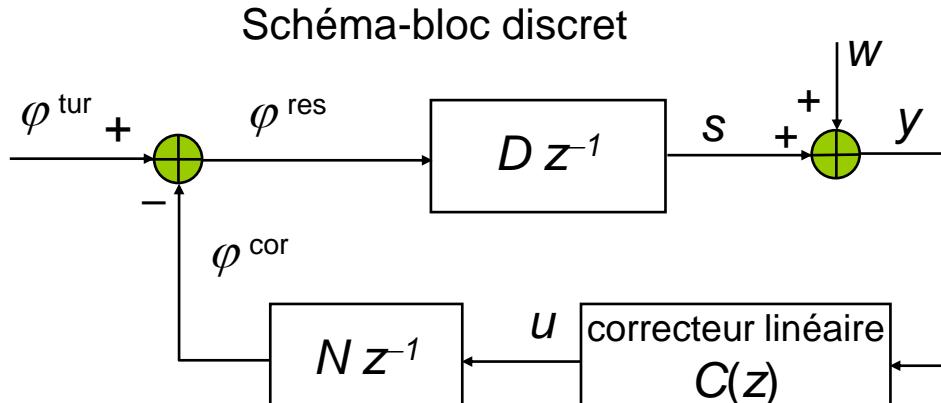
- galaxie NGC 7469, observée avec et sans optique adaptative (PUEO, CFHT)



*Crédit : CFHT (3.6m)*

Canada-France-Hawai telescope  
**Probing the Universe with Enhanced Optics**

# Asservissement à temps discret



Fonction de transfert boucle ouverte

$$NC(z)Dz^{-2}$$

Fonction de sensibilité = fonction de transfert de réjection

$$\varphi^{\text{res}}(z) = T_{\text{tur} \rightarrow \text{res}}(z)\varphi^{\text{tur}}(z)$$

Fonction de transfert boucle ouverte

$$L(z) = NC(z)Dz^{-2}$$

Fonction de sensibilité

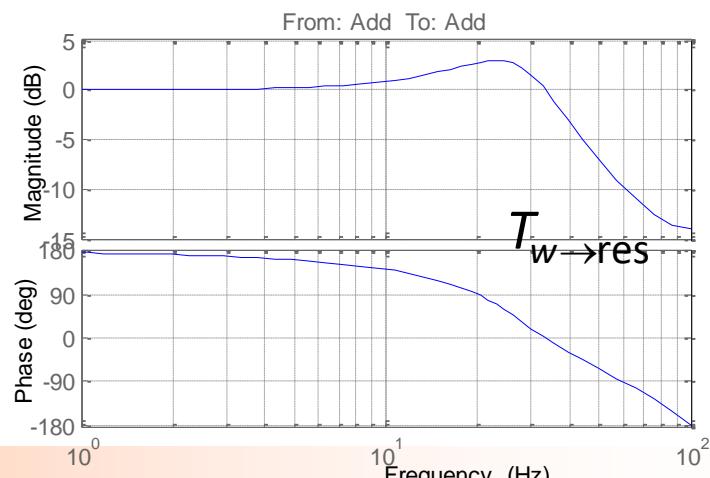
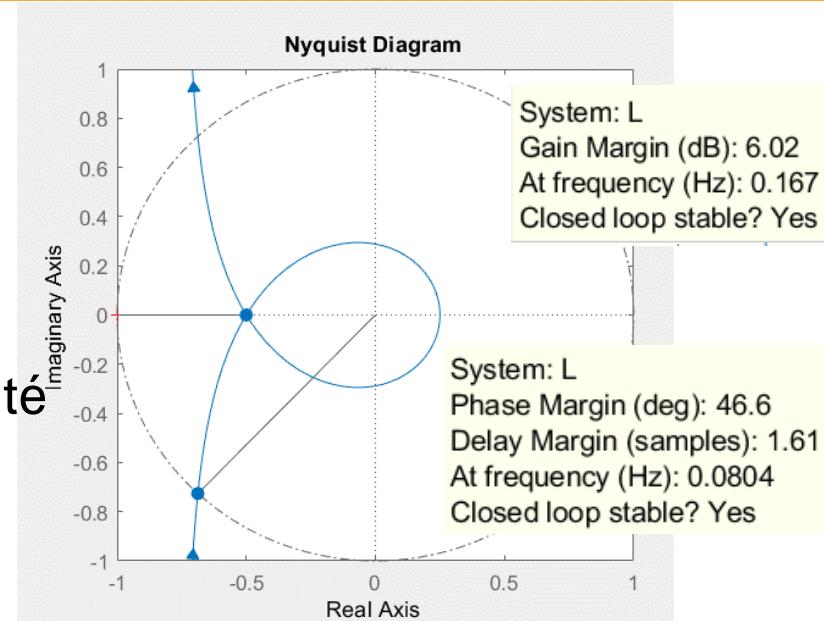
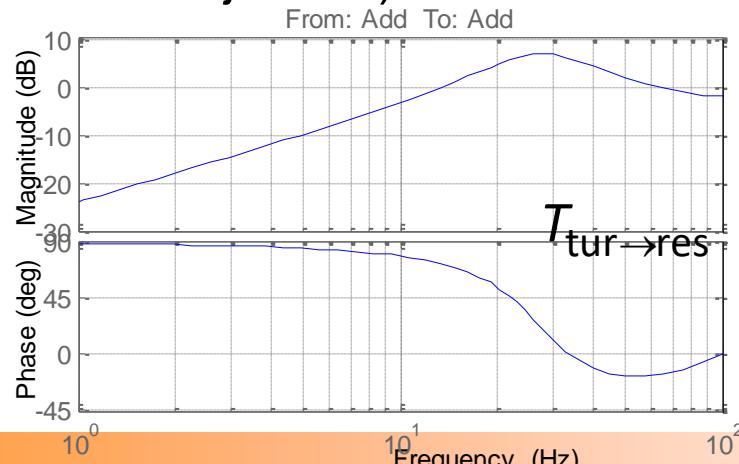
$$T_{\text{tur} \rightarrow \text{res}}(z) = (I + L(z))^{-1}$$

- Fonctions de transfert BO

- ▶ Transformée en  $z$
- ▶ Diagramme de Nyquist
- ▶ Critère du revers => marges de stabilité

- Fonctions de transfert BF

- ▶ Transfert du bruit avec  $T_{w \rightarrow res}(z)$
- ▶ Fonction de sensibilité  $T_{tur \rightarrow res}(z)$   
(transfert de réjection)



# Marges de stabilité de l'intégrateur

Diagramme de Bode

de la fonction de transfert en boucle ouverte  $L(e^{j\omega T_s})$

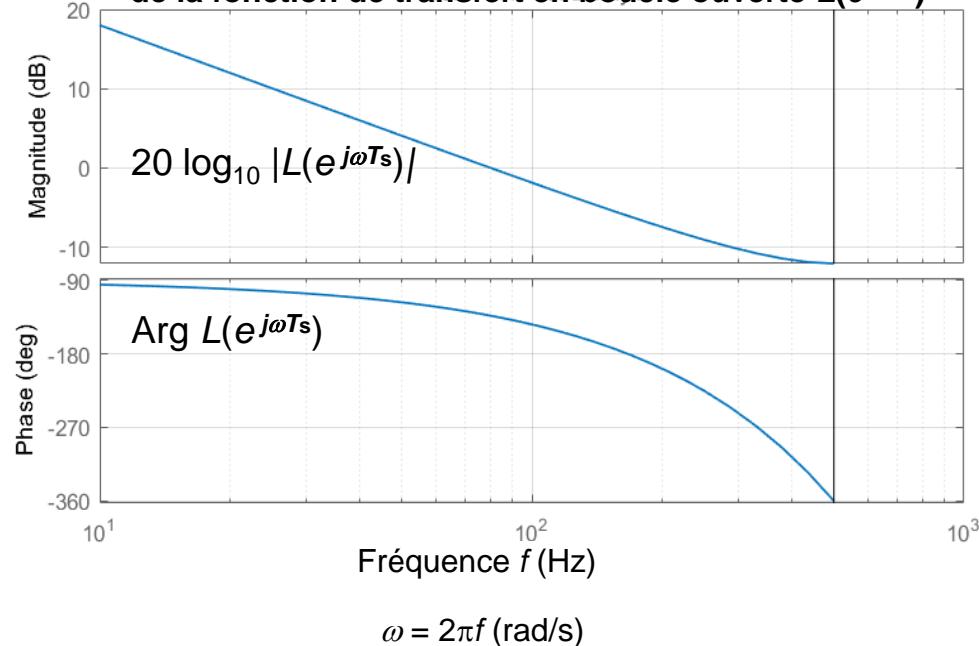
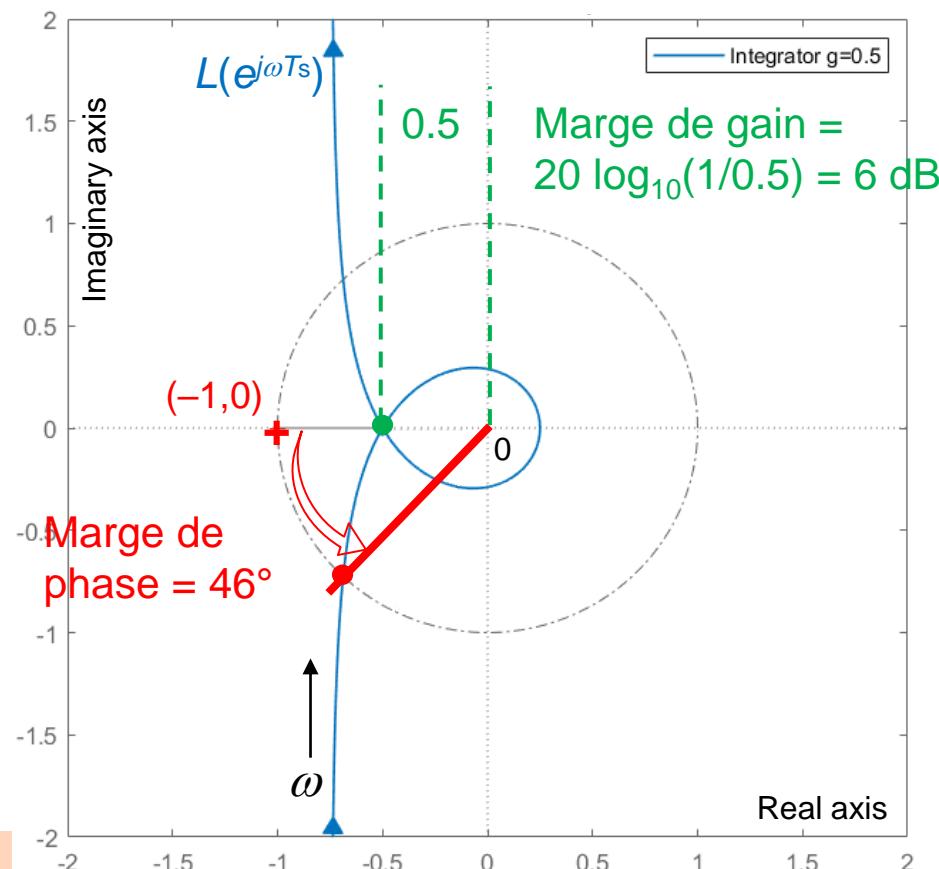
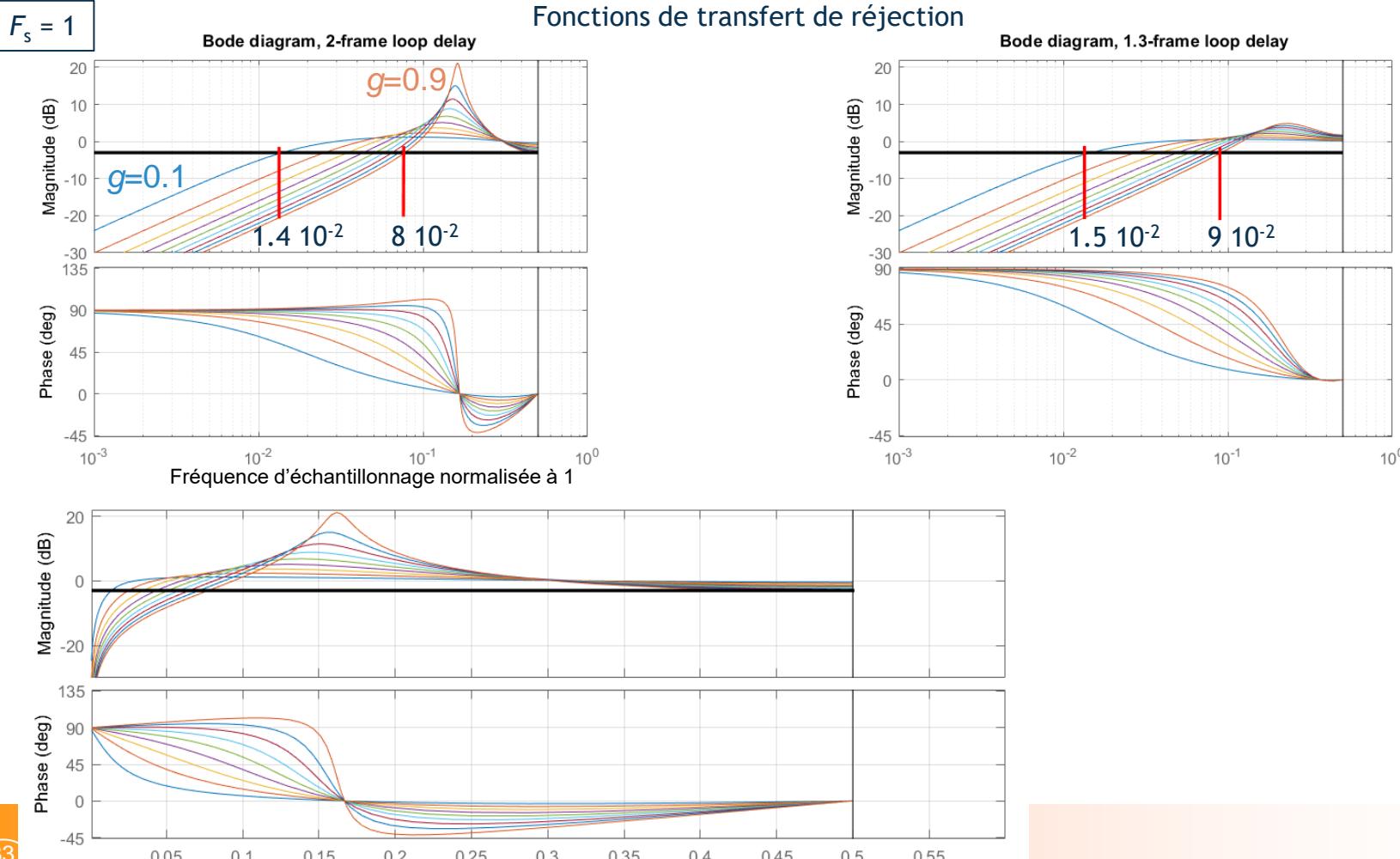


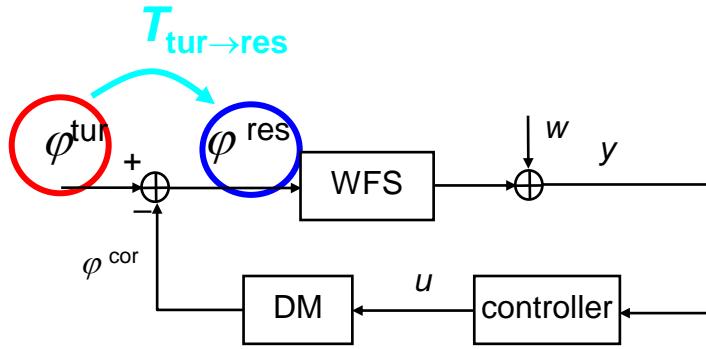
Diagramme de Nyquist de  $L(e^{j\omega T_s})$



- Comportements différents selon le retard de boucle
- Attention à l'overshoot !

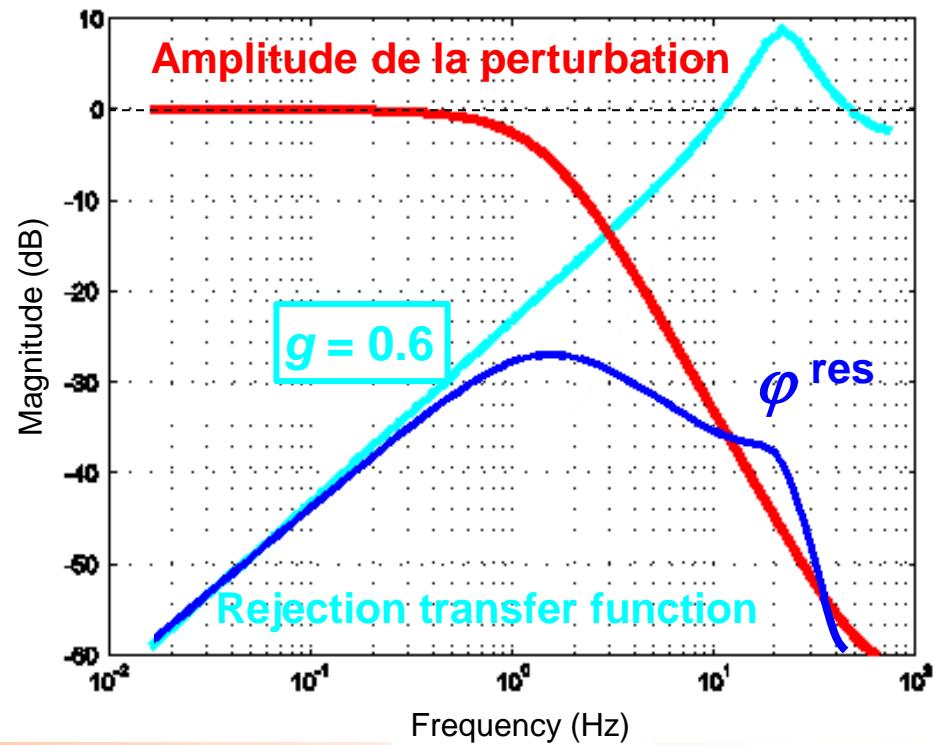


Cas avec 2 trames de retard



Integrator:

$$u_k = u_{k-1} + g M_{\text{com}} y_k$$



# Limites de la performance

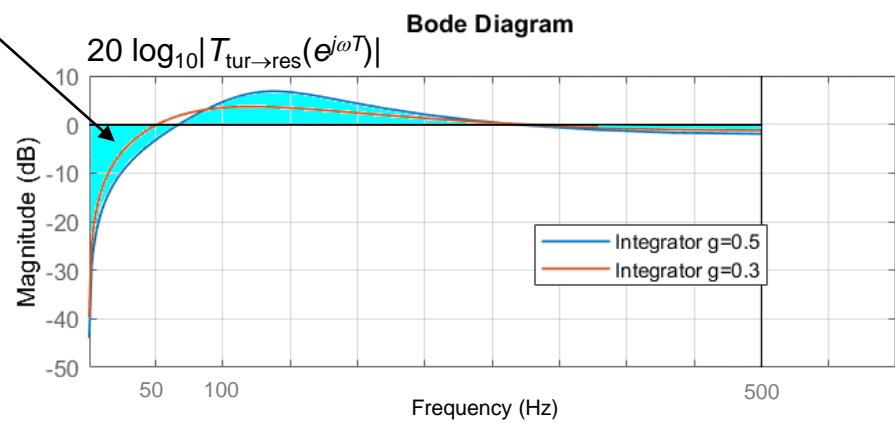
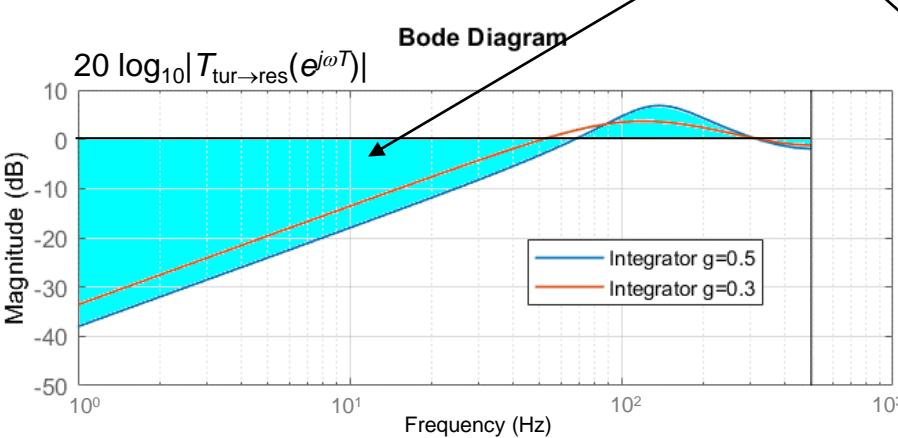
- Limitation principale de performance = retards
- Tous les correcteurs sont concernés

Si retard > 1 :

$$\int_0^{\pi} \log |T_{\text{tur} \rightarrow \text{res}}(e^{j\omega})| d\omega = 0$$

théorème de Bode, (Mohtadi, 1990)

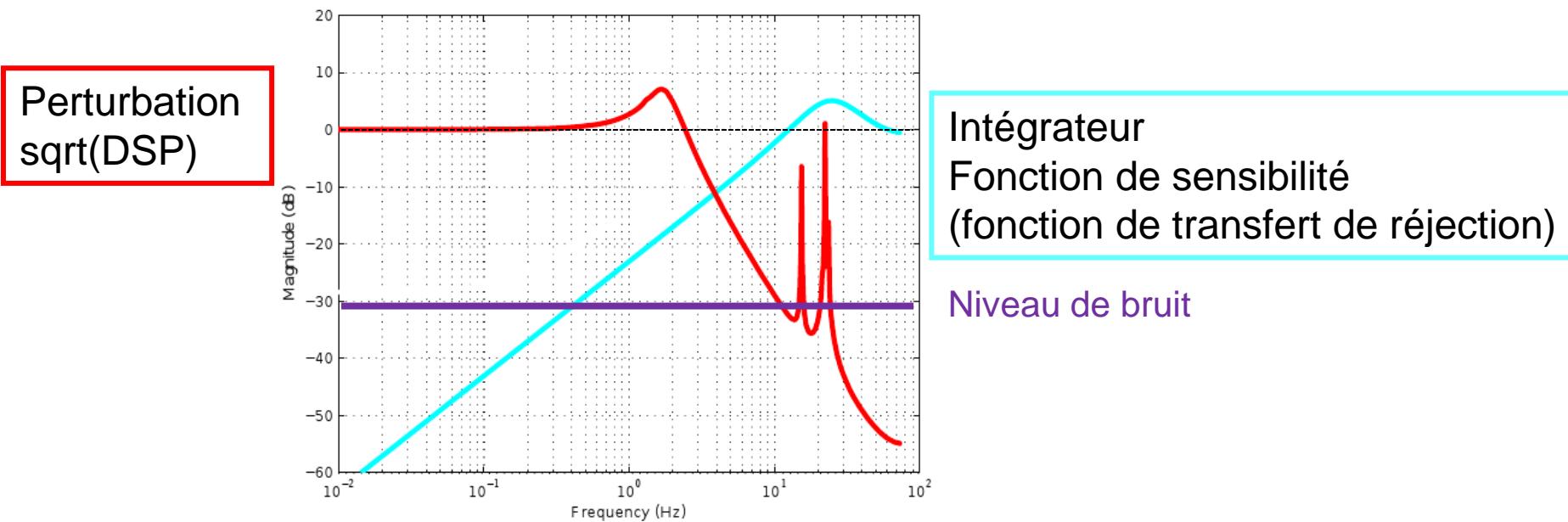
**Water-bed effect**



# Limites de la performance

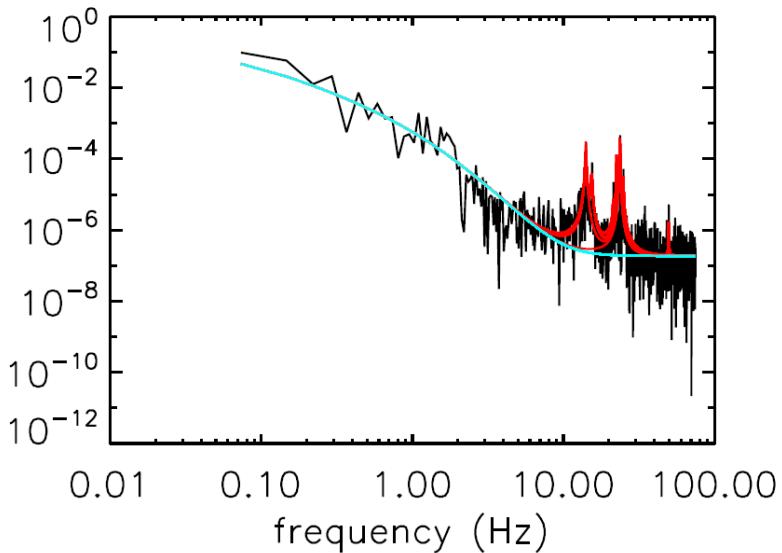
- Comprendre les problèmes de performance

$$\text{DSP(Phase résiduelle)} = |T_{\text{tur} \rightarrow \text{res}}|^2 \text{ DSP(Perturbation)}$$

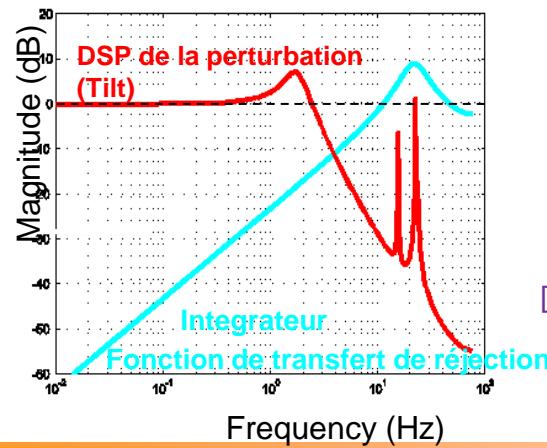


# Perturbations complexes

PSD



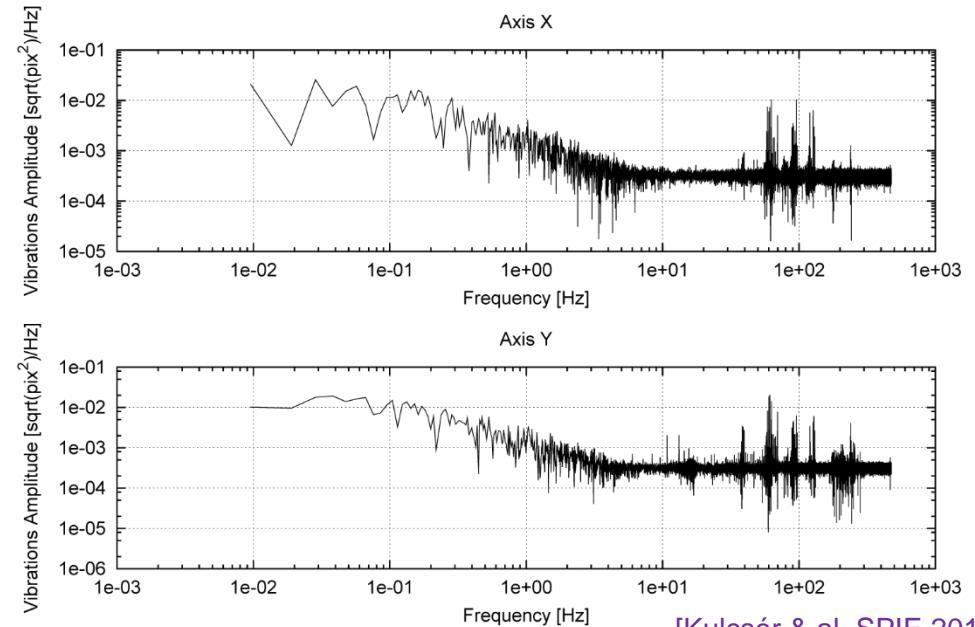
Tip modes @WHT-CANARY G. Sivo



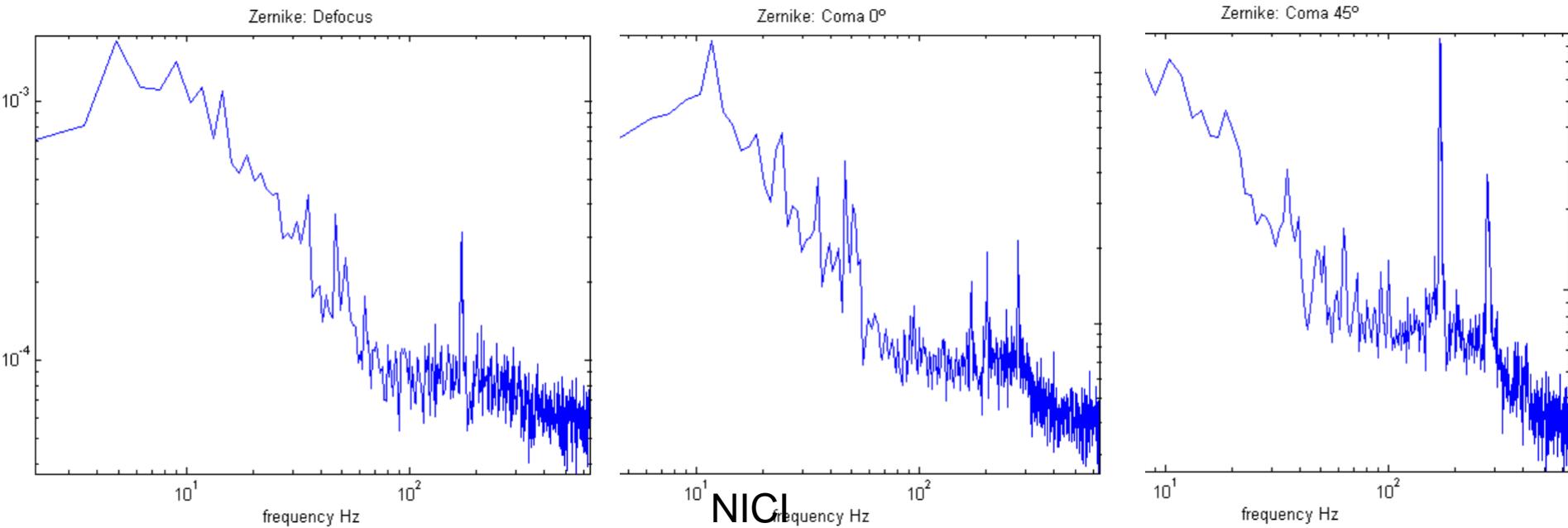
[Sivo & al, Opt. Expr. 2014]

Tip & tilt modes  
Subaru @ Hawaii

HiCIAO rubber - August 17th 2011

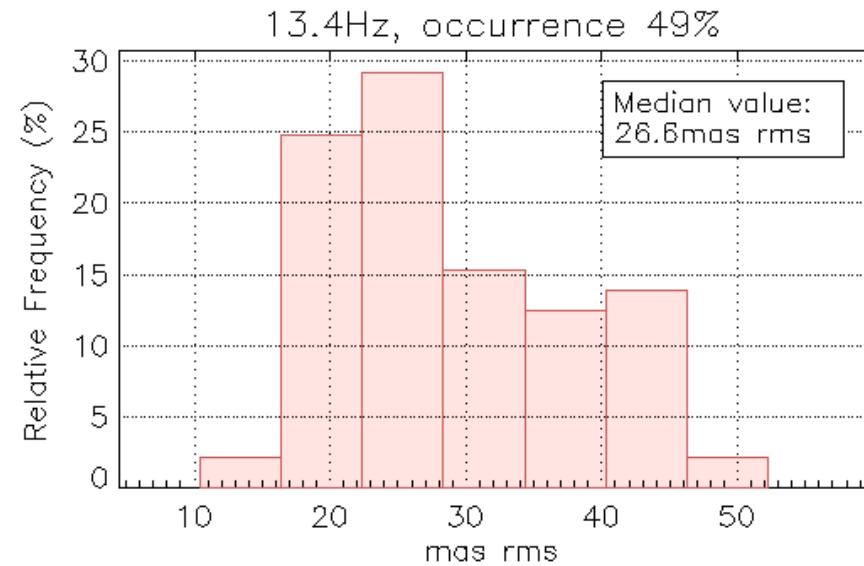
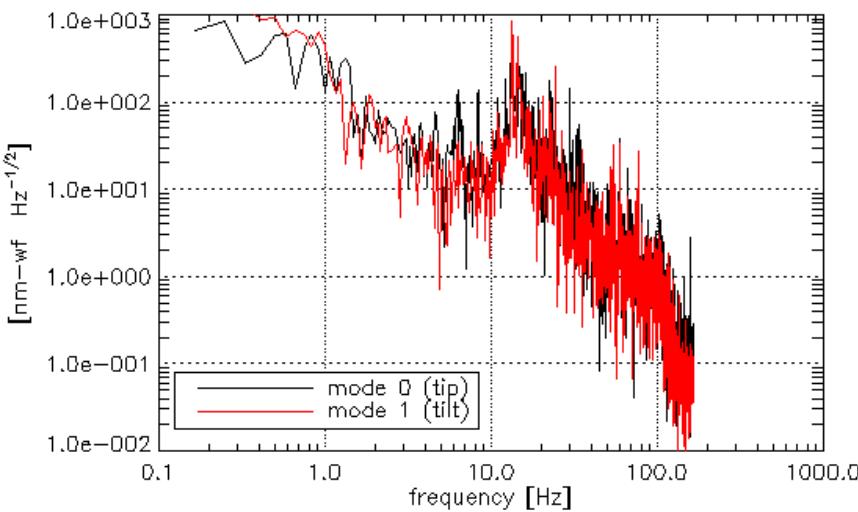


[Kulcsár & al, SPIE 2012]

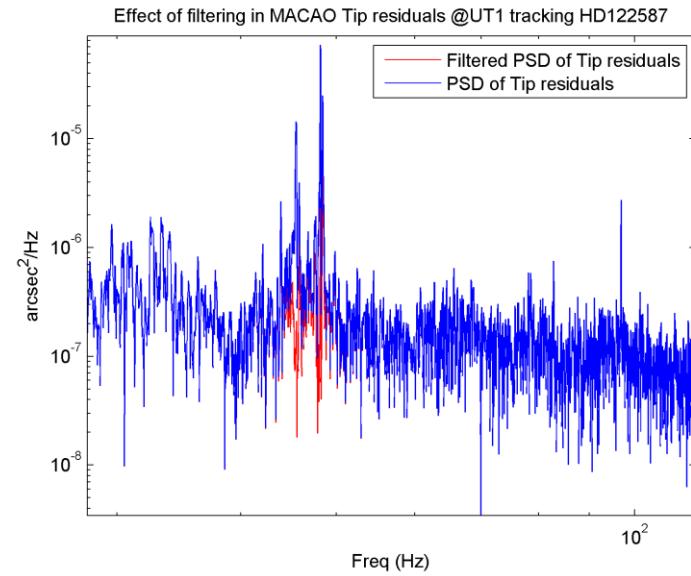
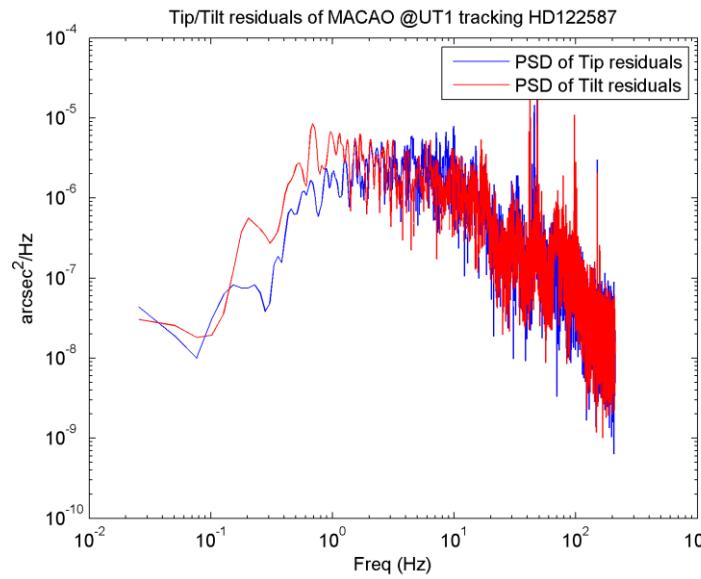


# Large Binocular Telescope

- 2 miroirs de 8,4 m
- Chute de 80% à 40 % du Rapport de Strehl



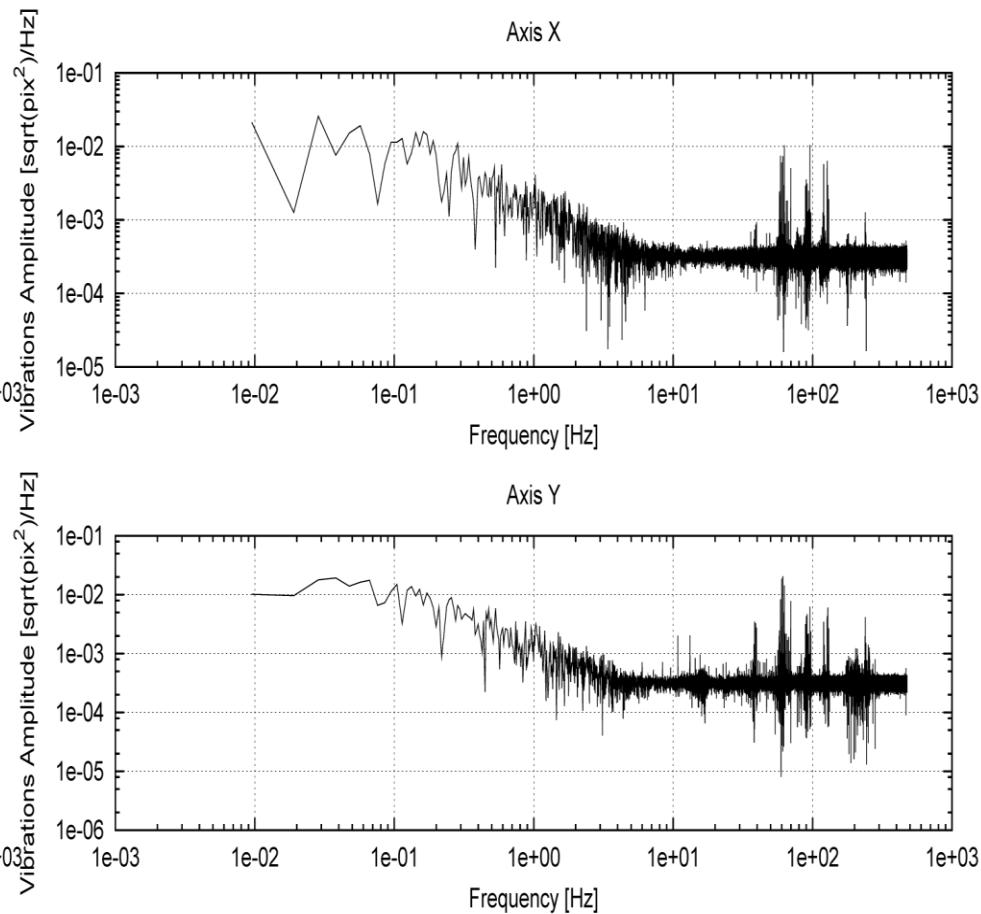
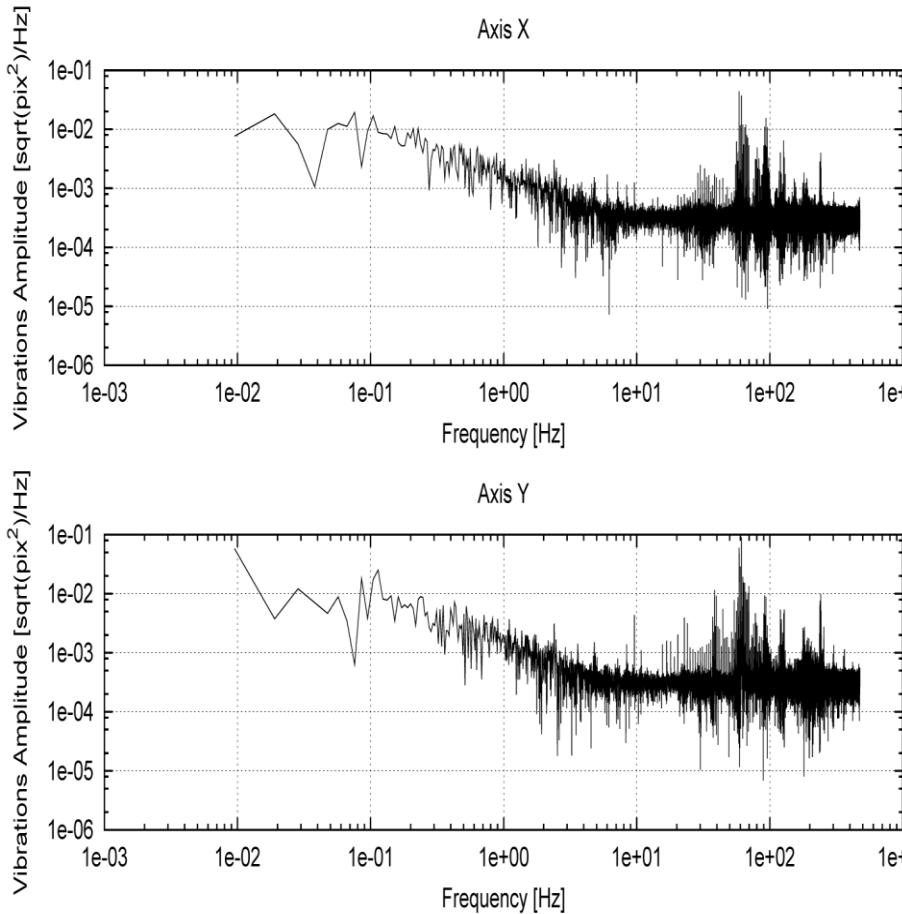
- Télescope de 8 m
- Amélioration possible de 8-10% sur le tip-tilt avec une commande plus performante



## ● Atténuation mécanique (passive)

HiCIAO 10 pounds lifted - August 17th 2011

HiCIAO rubber - August 17th 2011



# Commande haute performance ?

Pas de critère  
Pas de modèle

$$u_k = u_{k-1} + gM_{\text{com}} y_k$$



Attention à la  
stabilité  
Performance ?



Perturbations complexes ?  
Systèmes complexes ?



Commande optimale =  
Théorie de la commande et  
modélisation



# Commande haute performance

- Le régulateur est adapté à la perturbation
- La fonction de transfert de rejection aussi
- Une commande optimale minimize la variance de la phase résiduelle

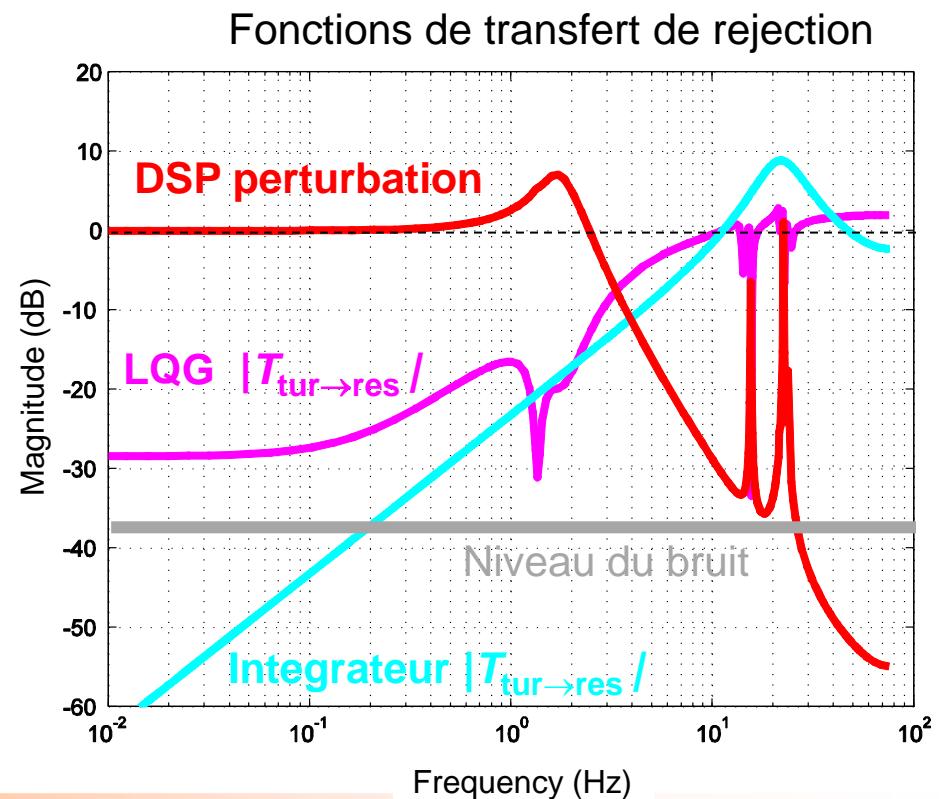
Optimale  
 = commande à variance minimale  
 = régulateur Linéaire Quadratique Gaussien (LQG)

Paschall & al, IEEE CDC 1991

Le Roux & al, JOSA A 2004

Kulcsár & al, Opt. Expr. 2006

Kulcsár & al, Automatica 2012



# Optimiser la performance

- Critère de performance :  $J(u) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \|\varphi_k^{\text{res}}\|^2$
- Parseval :  $J(u) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S_{\varphi^{\text{res}}} (e^{i\theta}) d\theta$        $S_x$  = DSP de  $x$
- Hypothèse :  $\varphi^{\text{tur}}$  et  $w$  ergodiques stationnaires et indépendants

$$J(u) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{trace} \left( T_{\text{tur} \rightarrow \text{res}} (e^{i\theta}) S_{\varphi^{\text{tur}}} T_{\text{tur} \rightarrow \text{res}} (e^{i\theta})^* \right) d\theta$$

$$+ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{trace} \left( T_{w \rightarrow \text{res}} (e^{i\theta}) S_w T_{w \rightarrow \text{res}} (e^{i\theta})^* \right) d\theta$$

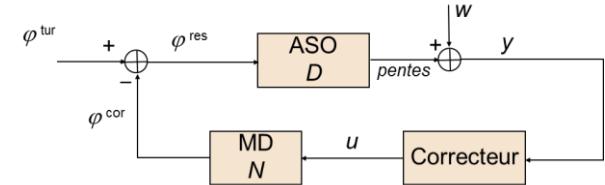
Hypothèses sur la DSP de  $\varphi^{\text{tur}}$  = modèle de phase turbulente

- Équation de mesure : linéaire, retard  $T$  (intégration), bruit
  - Intégration flux lumineux + lecture caméra + calcul pentes + bruit blanc

$$y_k = \frac{1}{T} \int_{(k-2)T}^{(k-1)T} D\varphi^{\text{res}}(t) dt + w_k$$

$$y_k = D\varphi_{k-1}^{\text{res}} + w_k$$

Notation :  $x_k = \frac{1}{T} \int_{(k-1)T}^{kT} x(t) dt$



- Phase de correction constante sur  $T$ , retard  $T$  (calculs)

$$\varphi^{\text{cor}}(t) = Nu_{k-1} \quad \text{pour } (k-1)T \leq t < kT$$

$$\varphi_k^{\text{cor}} = Nu_{k-1}$$

- Phase résiduelle

$$\varphi_k^{\text{res}} = \varphi_k^{\text{tur}} - \varphi_k^{\text{cor}}$$

- Critère de performance

$$J(u) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \| \varphi_{k+1}^{\text{tur}} - Nu_k \|^2$$

- Théorème de séparation stochastique

- ▶ Hypothèse d'information complète :

- ▶ Valeurs de la phase supposées connues

- ▶ Commande optimale = solution moindres carrés de  $Nu_k = \varphi_{k+1}^{\text{tur}}$

$$\min_u \| \varphi_{k+1}^{\text{tur}} - Nu_k \|^2$$

$$u_k = N^\dagger \varphi_{k+1}^{\text{tur}} = (N^T N)^{-1} N^T \varphi_{k+1}^{\text{tur}}$$

- ▶ Et en information incomplète (la réalité)

$$u_k = N^\dagger \hat{\varphi}_{k+1|k}^{\text{tur}} = N^\dagger E[\varphi_{k+1}^{\text{tur}} | \mathcal{Y}_k]$$

Partie critique = modèle de phase turbulente pour le calcul de la prédiction

- Équations de mesure et de correction

$$y_k = D\varphi_{k-1}^{\text{res}} + w_k$$

$$\varphi_k^{\text{res}} = \varphi_k^{\text{tur}} - \varphi_k^{\text{cor}}$$

$$\varphi_k^{\text{cor}} = Nu_{k-1}$$

$$y_k = D\varphi_{k-1}^{\text{tur}} - DNu_{k-2} + w_k$$

- Modèle stochastique de phase turbulente ?

► Exemple :

$$\varphi_{k+1}^{\text{tur}} = A_1^{\text{tur}} \varphi_k^{\text{tur}} + A_2^{\text{tur}} \varphi_{k-1}^{\text{tur}} + \eta_k$$

- Modèle d'état

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + V_k \\ \varphi_k^{\text{tur}} = C_\varphi X_k \\ y_k = CX_k - DNu_{k-2} + w_k \end{cases}$$

- Équations de mesure et de correction

$$y_k = D\varphi_{k-1}^{\text{res}} + w_k$$

$$\varphi_k^{\text{res}} = \varphi_k^{\text{tur}} - \varphi_k^{\text{cor}}$$

$$\varphi_k^{\text{cor}} = Nu_{k-1}$$

$$y_k = D\varphi_{k-1}^{\text{tur}} - DNu_{k-2} + w_k$$

- Modèle stochastique de phase turbulente ?

► Exemple :

$$\varphi_{k+1}^{\text{tur}} = A_1^{\text{tur}} \varphi_k^{\text{tur}} + A_2^{\text{tur}} \varphi_{k-1}^{\text{tur}} + \eta_k$$

- Modèle d'état

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + V_k \\ \varphi_k^{\text{tur}} = C_\varphi X_k \\ y_k = CX_k - DNu_{k-2} + w_k \end{cases}$$

$$X_k = \begin{pmatrix} \varphi_k^{\text{tur}} \\ \varphi_{k-1}^{\text{tur}} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \varphi_{k+1}^{\text{tur}} \\ \varphi_k^{\text{tur}} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} A_1^{\text{tur}} & A_2^{\text{tur}} \\ I & 0 \end{pmatrix}}_C \begin{pmatrix} \varphi_k^{\text{tur}} \\ \varphi_{k-1}^{\text{tur}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \eta_k \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varphi_k^{\text{tur}} = \underbrace{\begin{pmatrix} I & 0 \end{pmatrix}}_{C_\varphi} X_k$$

$$y_k = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & D \end{pmatrix}}_D X_k - DNu_{k-2} + w_k$$

- Filtre de Kalman = observateur optimal (cas linéaire Gaussien) de la phase turbulente

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + H_\infty (y_k - \hat{y}_{k|k-1})$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k} \quad \hat{y}_{k|k-1} = C\hat{x}_{k|k-1} - DNu_{k-2}$$

Gain asymptotique  $H_\infty = \Sigma_\infty C^T (C\Sigma_\infty C^T + \Sigma_w)^{-1}$

Equation de Riccati algébrique discrète  $\Sigma_\infty = A\Sigma_\infty A^T + \Sigma_v - A\Sigma_\infty C^T (C\Sigma_\infty C^T + \Sigma_w)^{-1} C\Sigma_\infty A^T$

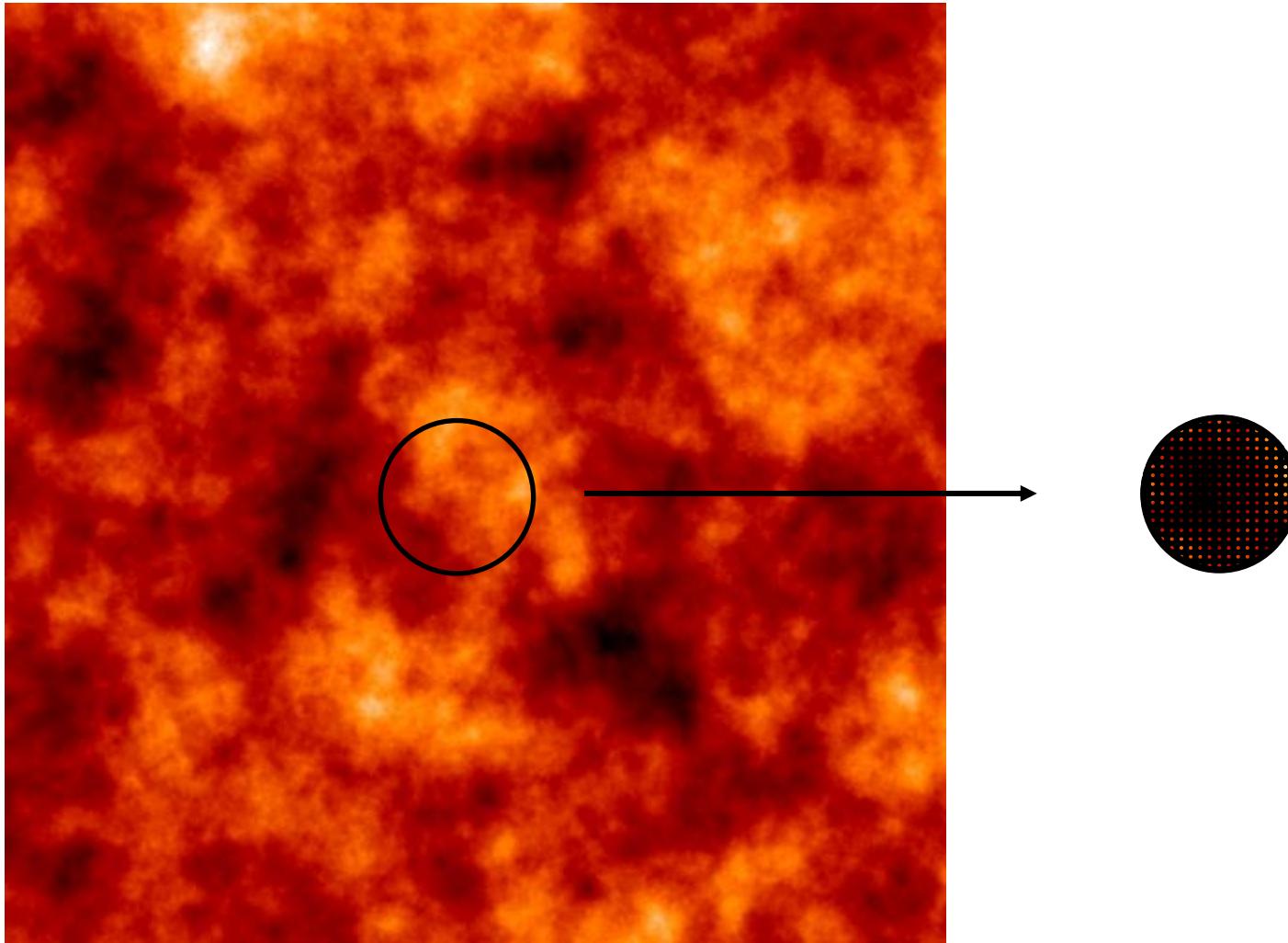
- Commande optimale LQG

$$u_k = N^\dagger \hat{\varphi}_{k+1|k}^{\text{tur}}$$

$$\varphi_k = C_\varphi x_k$$

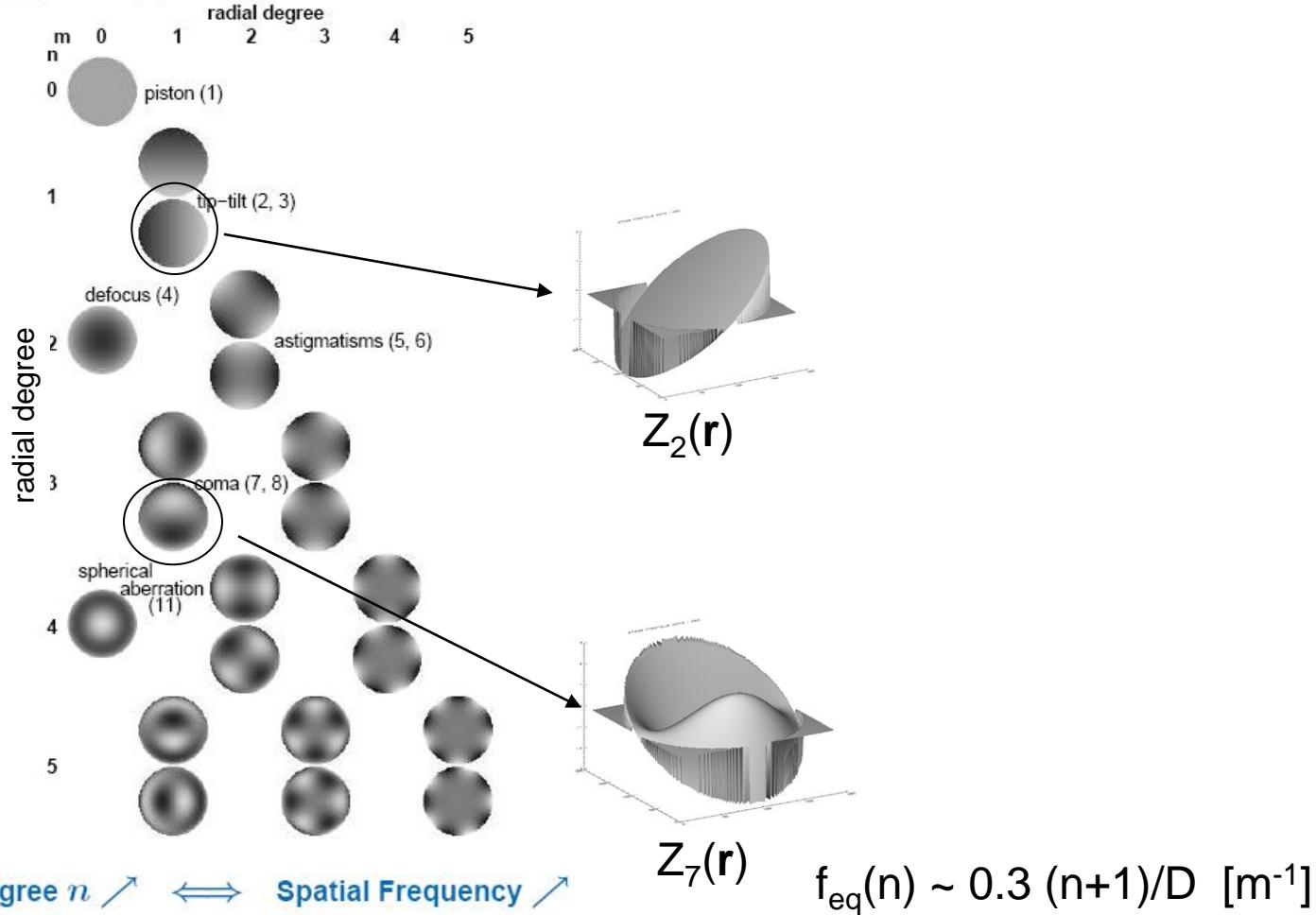
$$u_k = N^\dagger C_\varphi \hat{x}_{k+1|k}$$

- Représentation spatiale (zonale)



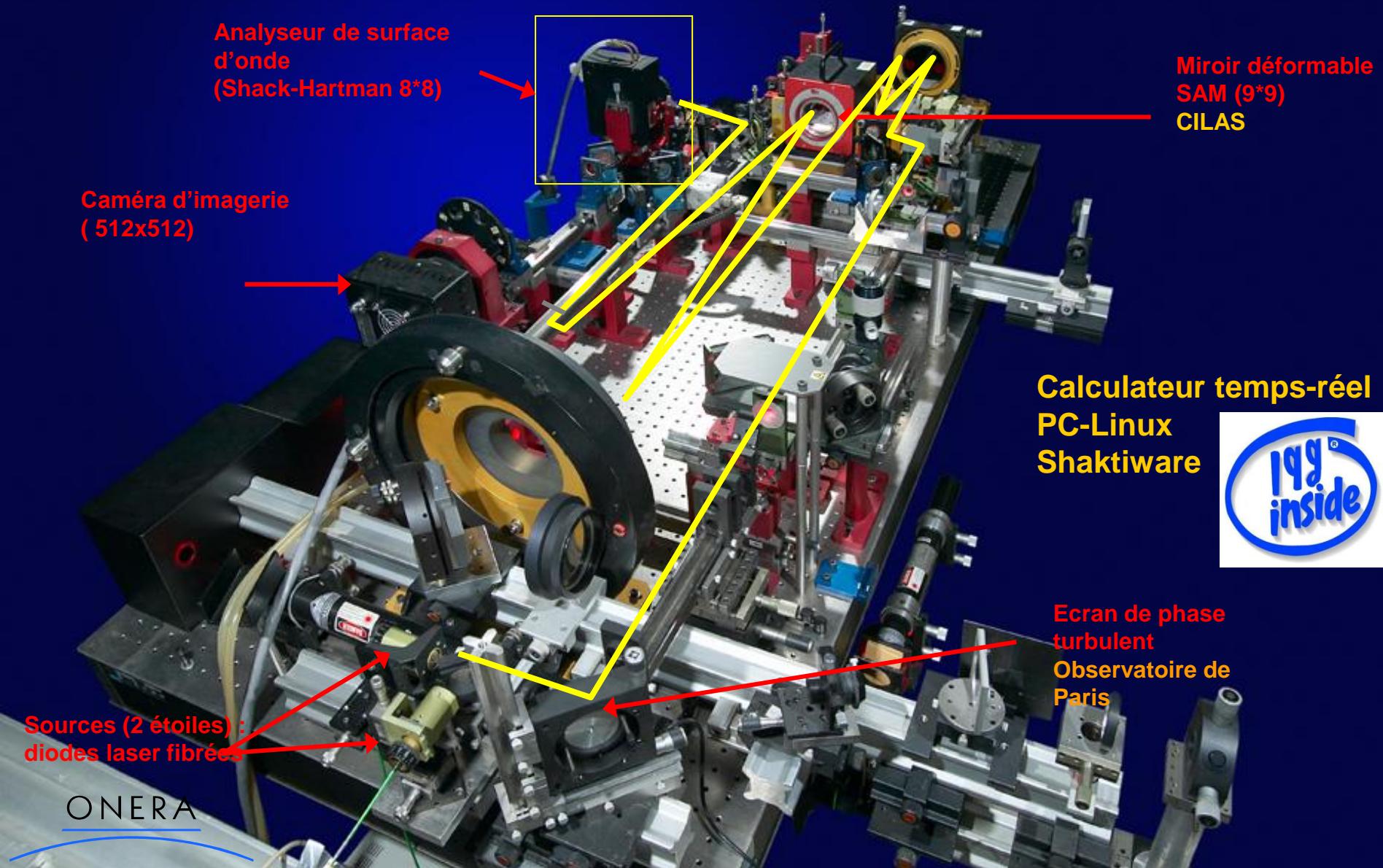
- Représentation modale (base de Zernike)

$$\phi(\mathbf{r}) = \sum_i \phi_i Z_i(\mathbf{r})$$



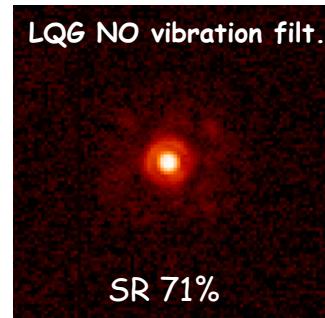
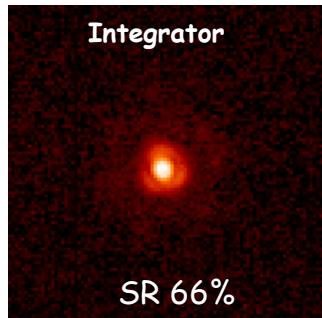
# Premières expérimentations banc BOA (ONERA)

Thèse Cyril Petit 2006



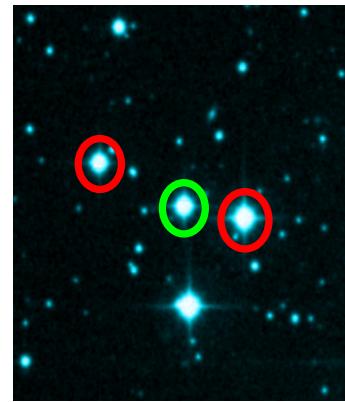
# Premiers résultats ciel de commande LQG

**SCAO K band**



**Août 2012**

**MOAO H band**



LQG + 2 NGS

SR 34%

LQG + 1 LGS + 2 NGS

SR 41%



**Septembre 2012**

- Filtre de Kalman

$$\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k-1} + \cancel{AH_{\infty}}(y_k - \hat{y}_{k|k-1}) \quad \text{Gain de Kalman calculé hors-ligne}$$

- ▶ Gain de Kalman  $L_{\infty} = AH_{\infty} = A\Sigma_{\infty}C^T(C\Sigma_{\infty}C^T + \Sigma_w)^{-1}$

$\Sigma_{\infty}$  solution de l'équation de Riccati algébrique

- Commande LQG : système d'OA sur télescope 4,2 m (CANARY)

$$u_k = (N^T N)^{-1} N^T \hat{\phi}_{k+1|k}^{\text{tur}}$$

Nb  
vibrations

- Calculs en ligne

Turb. 3 couches

Nb actionneurs

- ▶ Taille du vecteur d'état en standard :  $n = 2 \times 600 + 10 + 2 \times 56 = 1332$
- ▶ Complexité  $\ll n^2 + n \cdot n_y + n \cdot n_u \sim 2,1 \text{ Mflop}$
- ▶ Le RTC peut gérer un état à plus de 2000 composantes

# Télescope William Herschel Démonstrateur CANARY

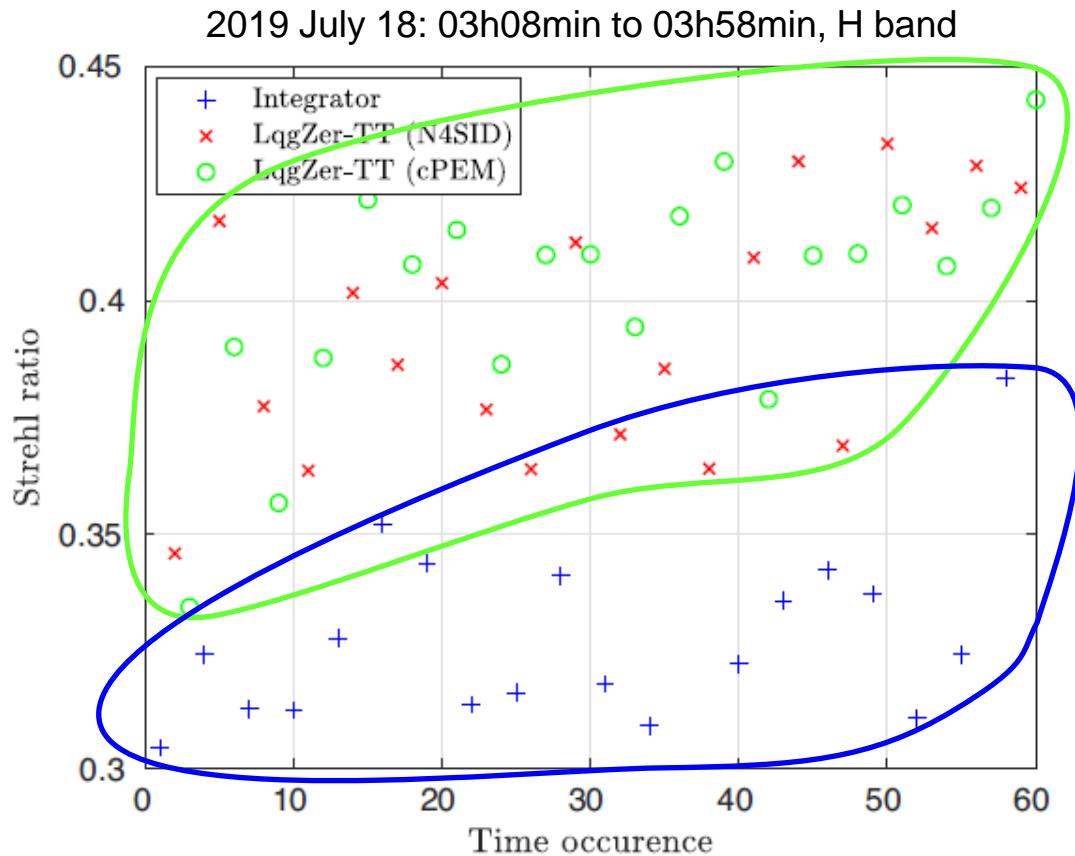


Photos C. Kulcsár / F. Vidal

Credit photo  
E. Gendron

# Résultats 2019

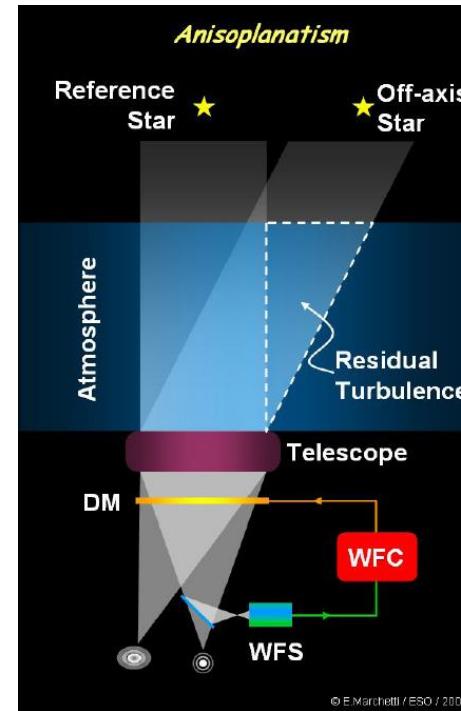
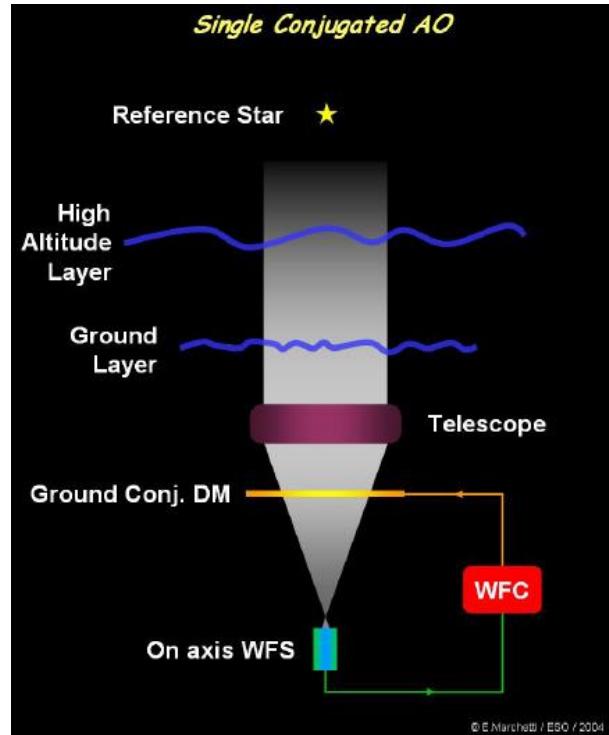
- Modèle pour les bas ordres identifié sur les mesures
  - Commande LQG efficace et stable



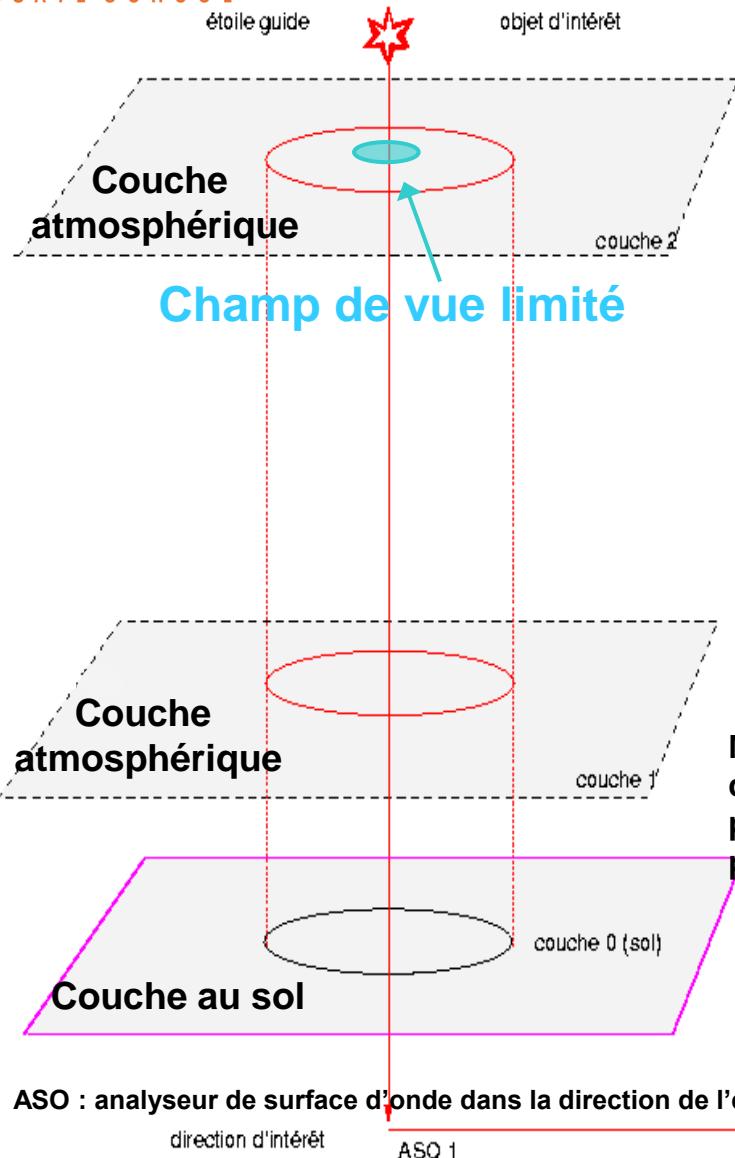
Large wind speeds ( $> 12 \text{ m/s}$ )  
 $r_0$  in the range  $\sim [6 - 22] \text{ cm}$

B. Sinquin & al, MNRAS 2020

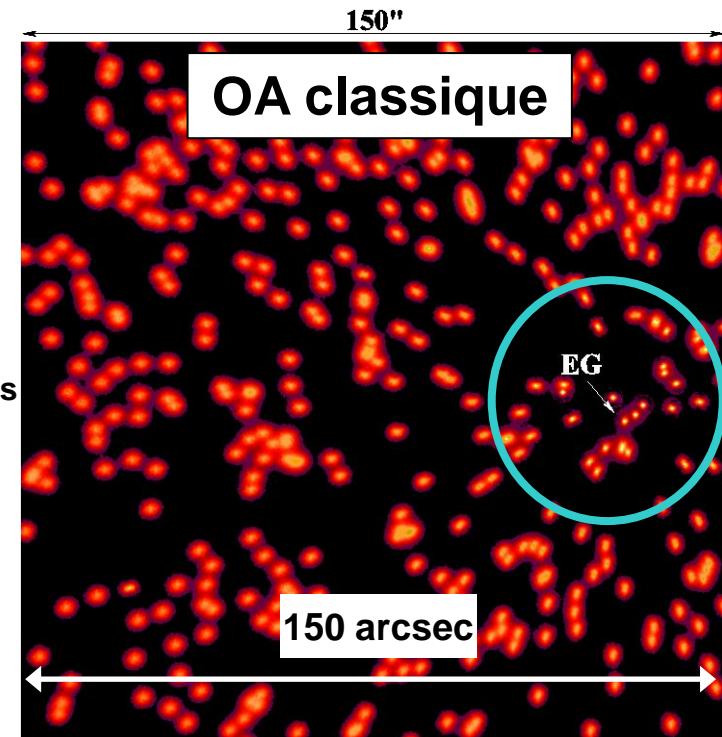
- Un champ d'observation limité par l'anisoplanétisme



# Limitation due à l'anisoplanétisme



**L'OA classique permet de corriger un champ de vue limité autour de l'étoile guide (EG)**



MD : le miroir déformable corrige les perturbations dans la pupille

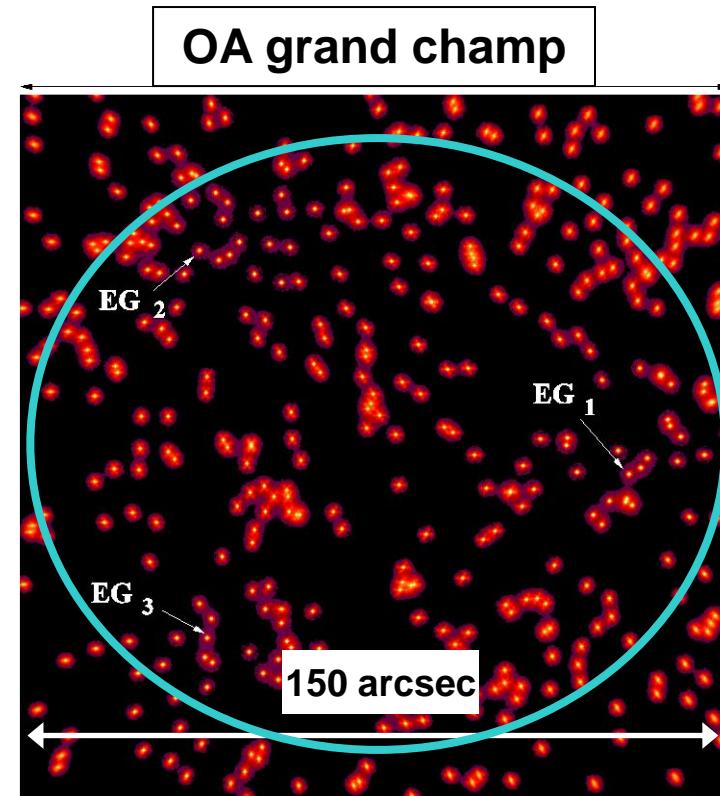
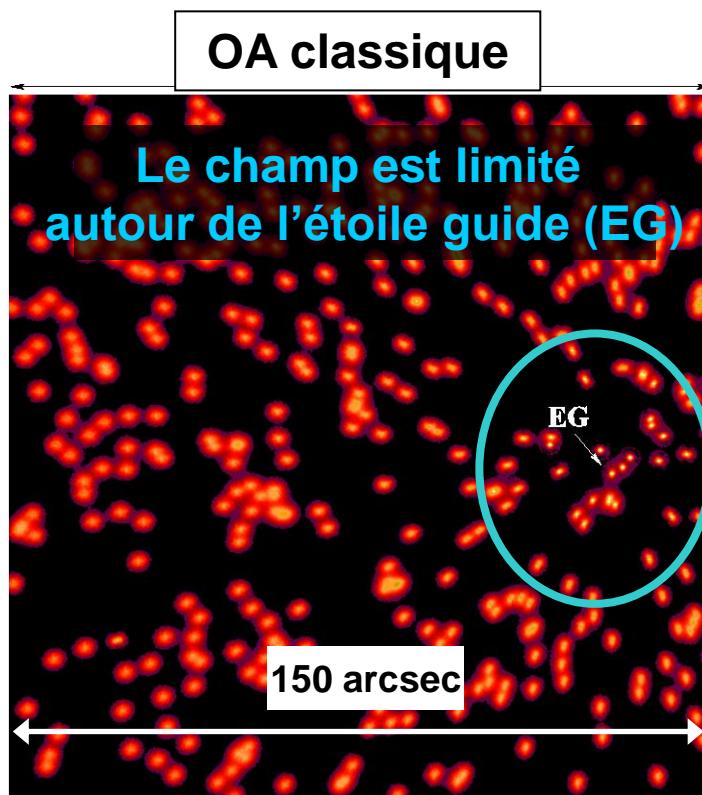
altitude de conjugaison 1

Correcteur

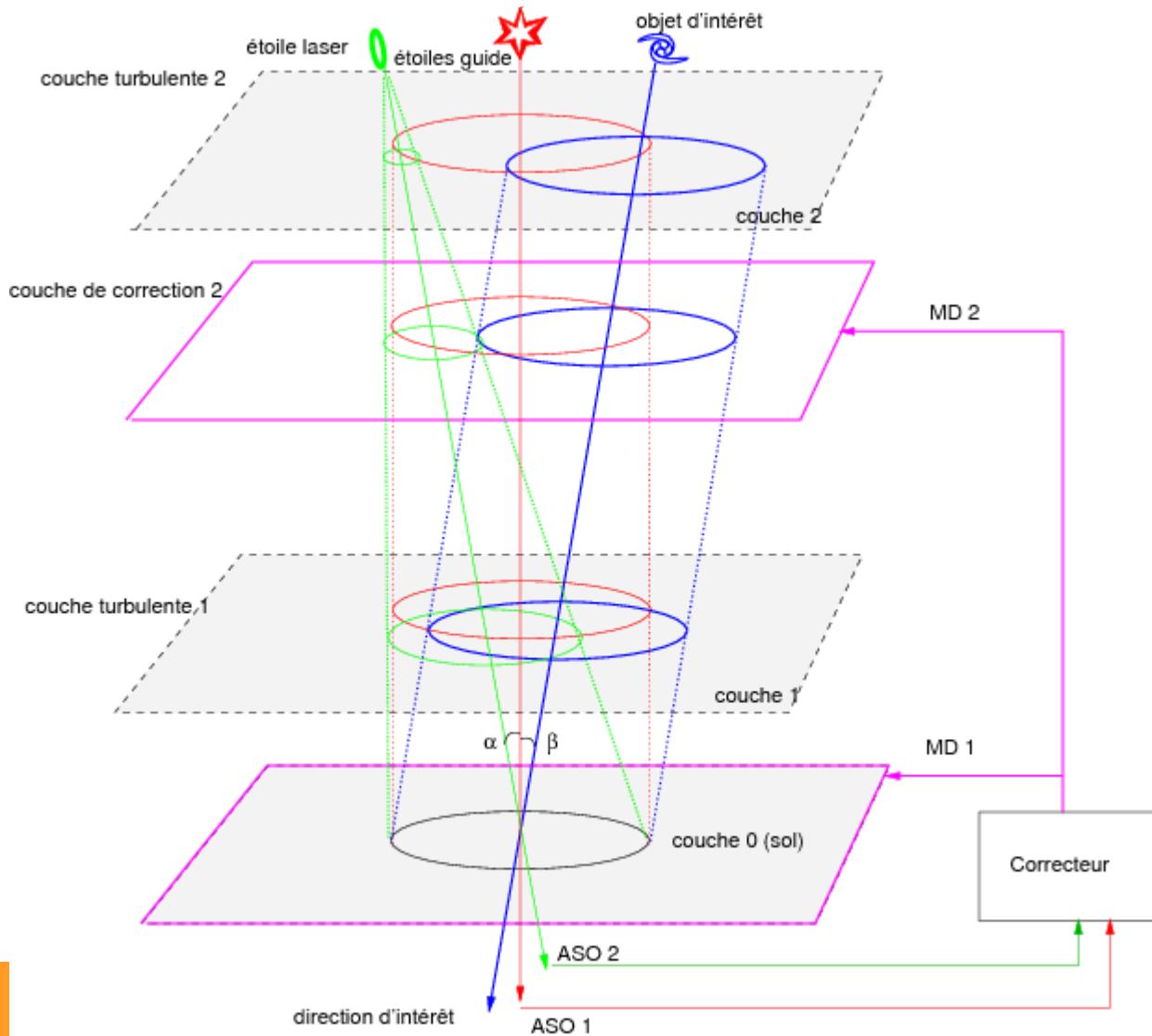
# L'OA grand champ

## Augmenter la couverture de ciel

- analyser la turbulence dans plusieurs directions
- corriger la turbulence avec plusieurs miroirs déformables



# De l'OA classique au grand champ



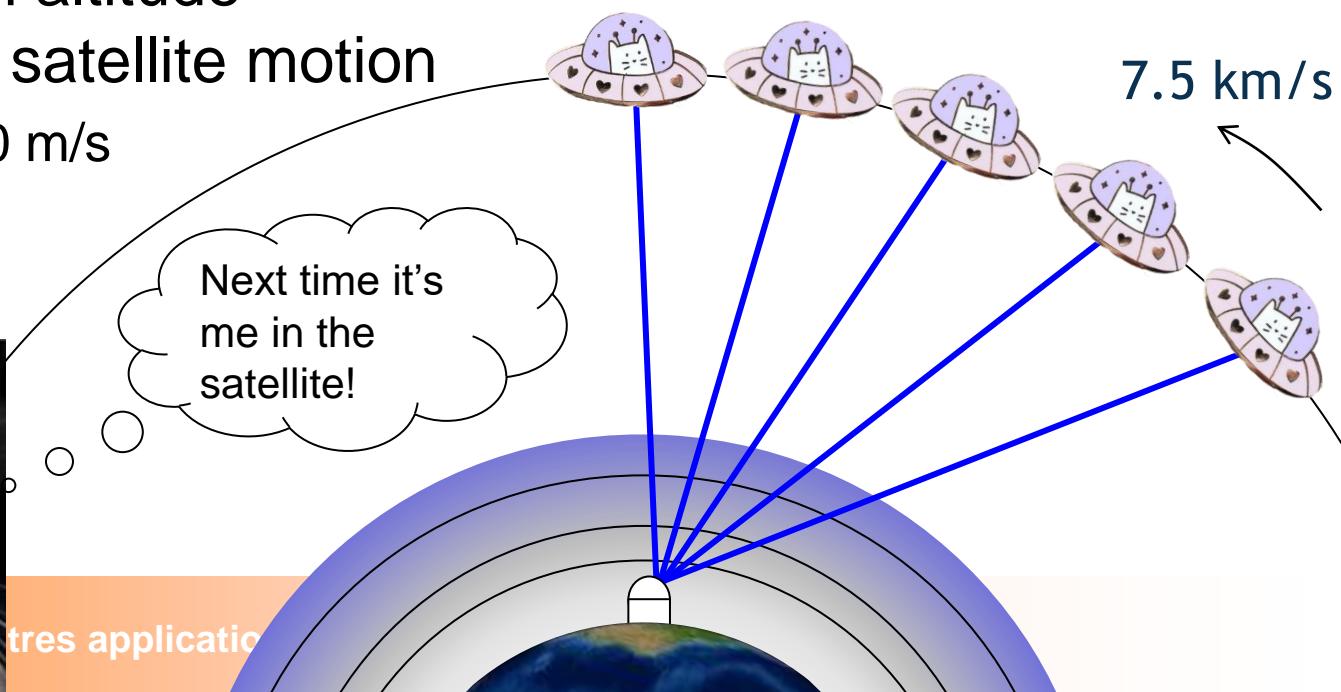
- Augmenter la couverture de ciel
  - ▶ OA grand champ
  - ▶ Systèmes de très grandes dimensions
- Amélioration de la mesure
- Amélioration des performances de correction
  - ▶ En particulier pour la détection d'exo-planètes
  - ▶ Apparition de nouveaux phénomènes (vibrations, . . . )
  - ▶ Affiner les modèles des perturbations
- Autres contextes applicatifs : satellites, débris, télécoms optiques, bio-médical, lasers, atomes froids

# Example of LEO satellite tracking

- Low-Earth Orbit (LEO) satellite
  - ▶ tracking/imaging, downlink optical communications
  - ▶ 765 km altitude, 7.5 km/s
  - ▶  $r_0 = 5.78 \text{ cm}$  @  $\lambda_{\text{WFS}} = 0.55 \mu\text{m}$
  - ▶  $F_{\text{sampl}} = 2 \text{ kHz}$
- Wind-speed in altitude dominated by satellite motion
  - ▶  $V = 10 \text{ to } 100 \text{ m/s}$

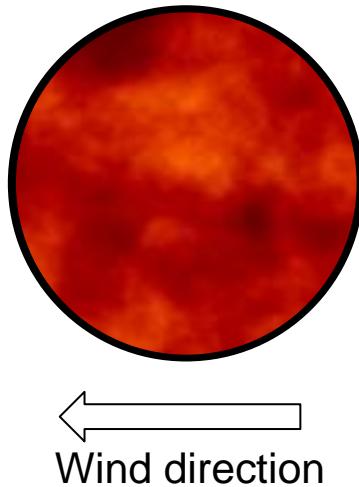


V. Quelq  
tres applicatio

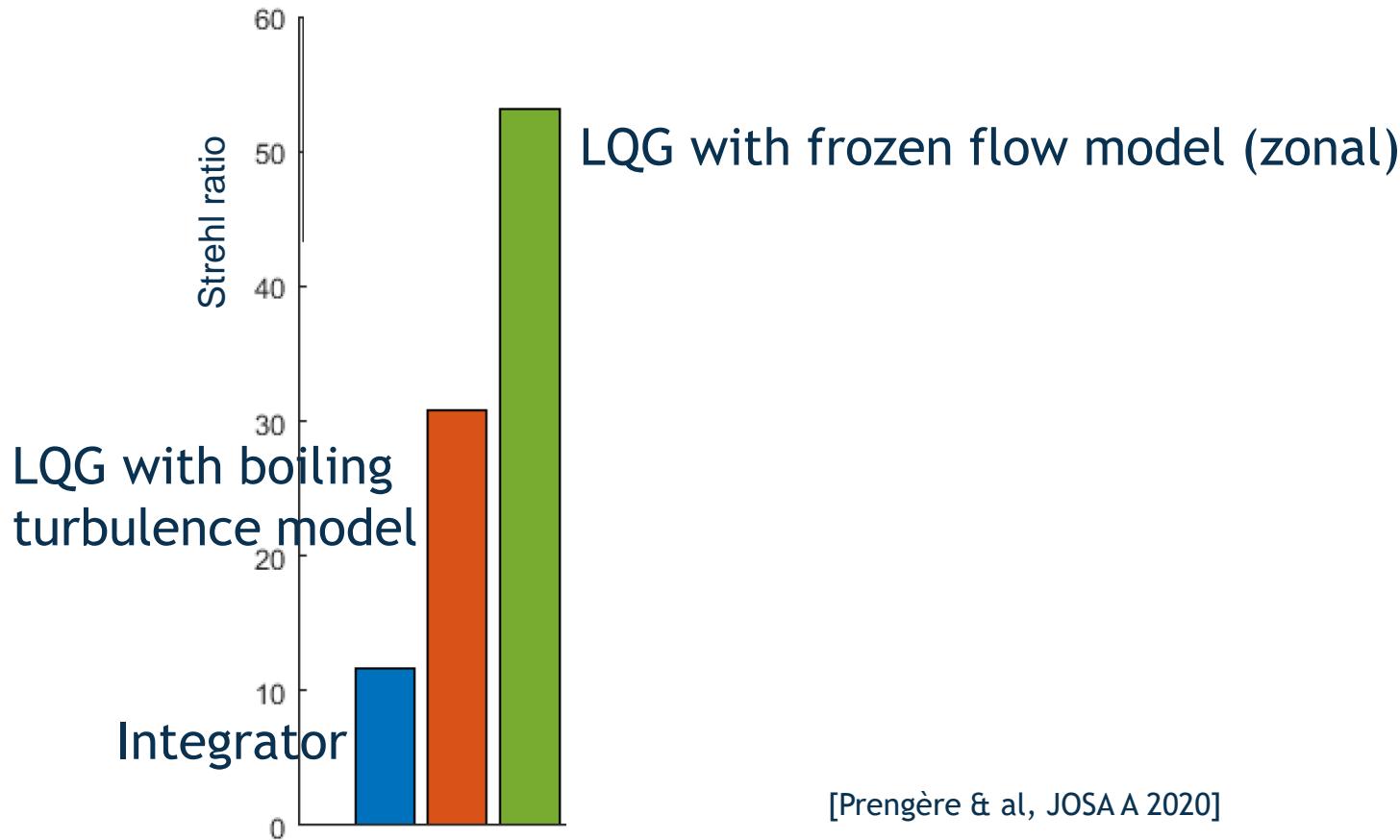


# Example of LEO satellite tracking

- Integrator control not adapted to extreme dynamics
- Disturbance modeling: frozen-flow hypothesis suitable

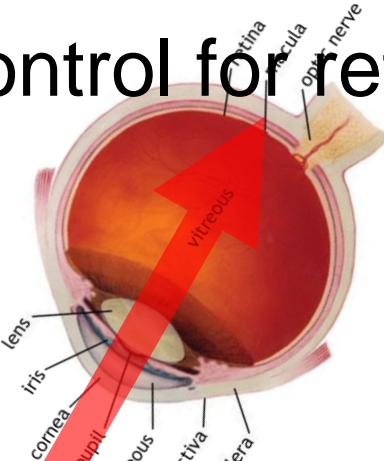


- Simulation – SR @ 0.8 μm

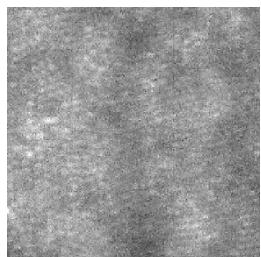


# AO control for retinal imaging

Disturbance  
Vitreous humour+lens  
+lacrimal film+eye motion

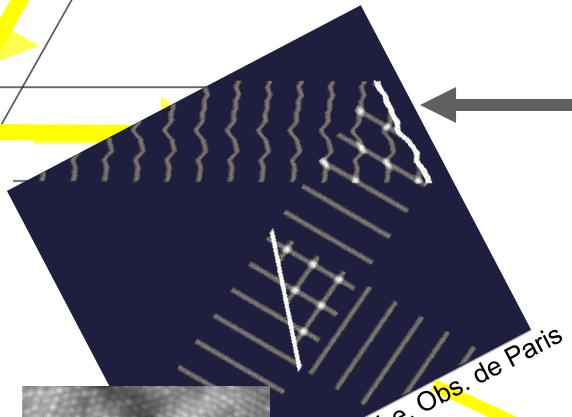


Without AO



[roorda.vision.berkeley.edu/  
ao\\_res.htm](http://roorda.vision.berkeley.edu/ao_res.htm)

Light

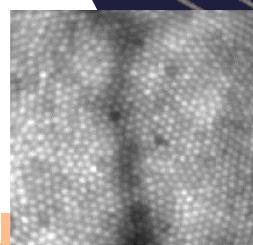


Deformable  
mirror

Real-time  
computer

Wavefront  
sensor

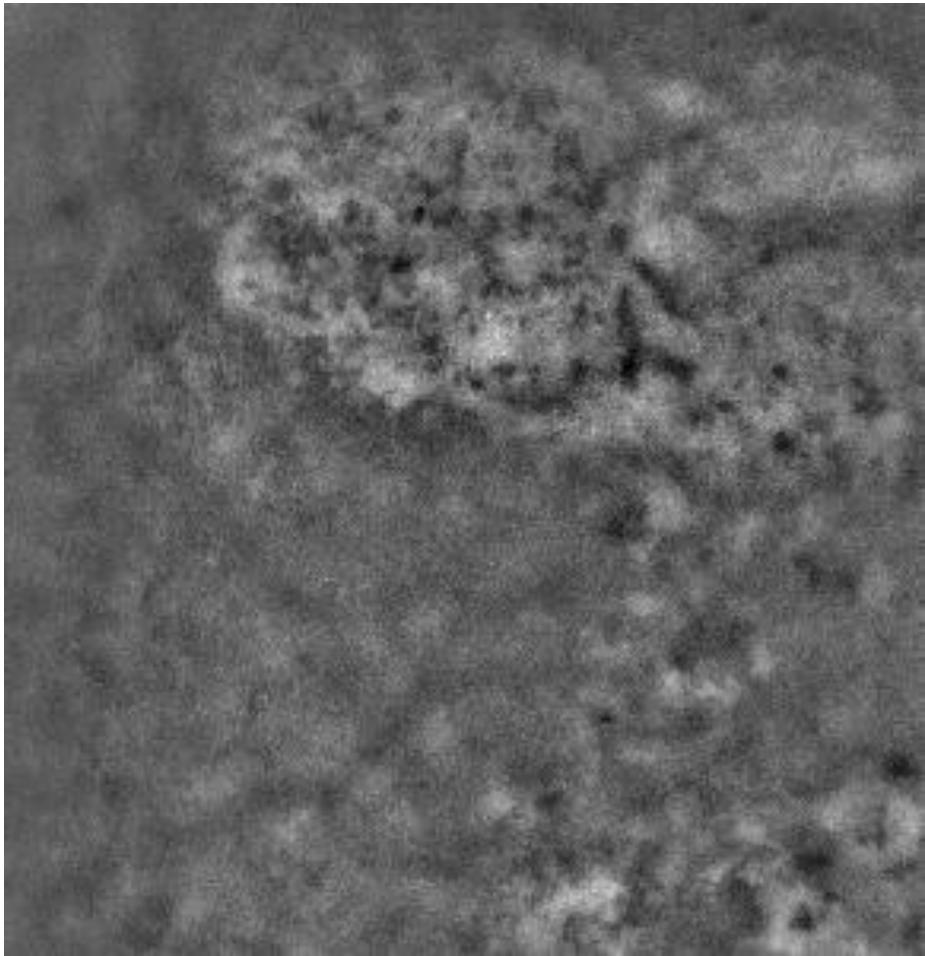
With AO



[roorda.vision.berkeley.edu/  
ao\\_res.htm](http://roorda.vision.berkeley.edu/<br/>ao_res.htm)

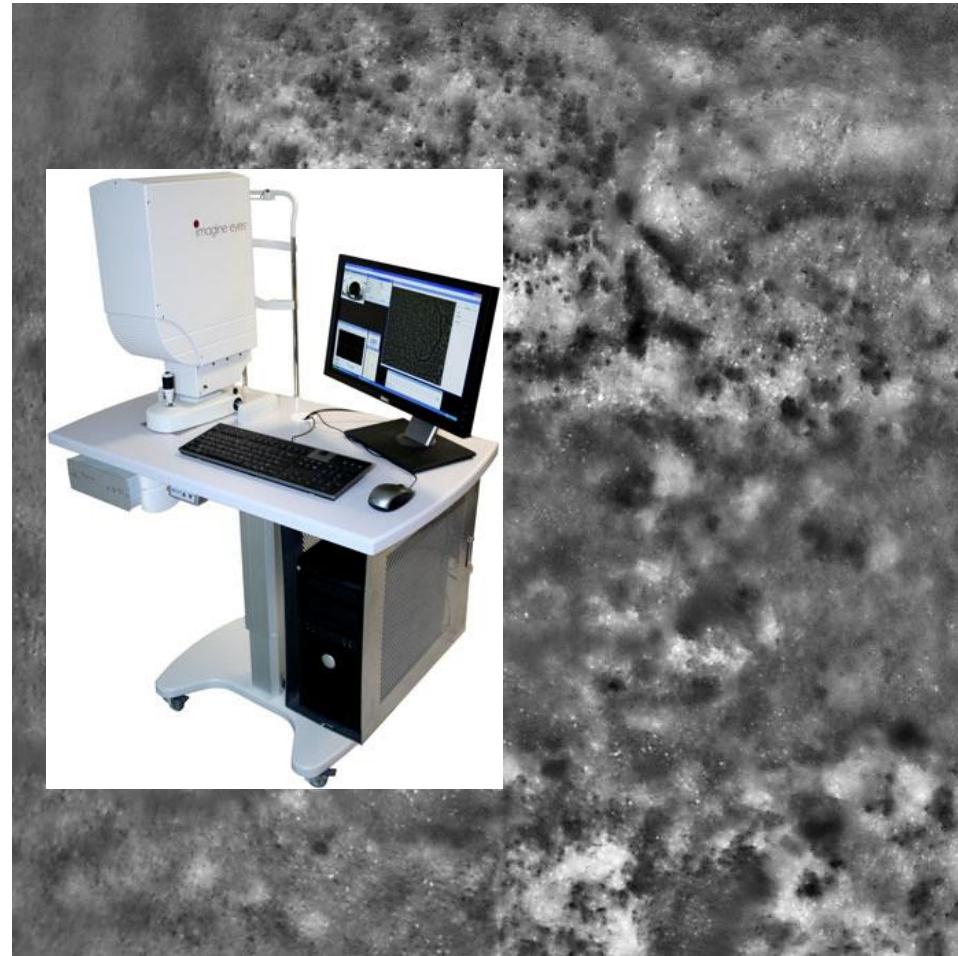
# Examples of reconstructed images

Raw sequence at 10 Hz



iPhot ANR project, [Kulcsar & al, OSA 2013]

Reconstruction with 13 images



Imagine Eyes rtx1 retinal camera

# Collaborations

| Astronomie   | Imagerie rétinienne  |
|--|--|
| <b>ONERA-DOTA</b> ONERA<br><br><b>ESO (Garching)</b> <br><br><b>Centre de Recherche Astrophysique de Lyon</b> | <b>GEMINI South (Chili)</b> <br><br><b>Thirty Meter Telescope</b>  |
| <b>LESIA (Meudon)</b><br><br><b>Instituto de Astrofísica de Canarias</b><br>  | <b>Durham University</b><br><br><b>LAM</b> <br><b>Lab. d'Astrophysique de Marseille</b>  |
|  | <b>ONERA-DTIS</b> <br><b>Hôp. Quinze-Vingts/ Institut de la Vision</b> <br><b>Imagine Eyes</b>  |
|  | <b>Communications optiques</b>   |
|  | <br><b>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</b>   |
|  | <b>Automatique</b>   |
|  | <b>Lab. de Tribologie et Dynamique des Systèmes (Ecully)</b> <br><b>Laboratoire Ampère (Lyon)</b>    |

# The European Extremely Large Telescope

2029 ?

