

Haute résolution angulaire

Optique adaptative

Master 2 A&A : instruments et méthodes d'observations

28 octobre 2021

Raphaël Galicher
raphael.galicher @ obspm.fr



Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

Limites fondamentales de la SCAO

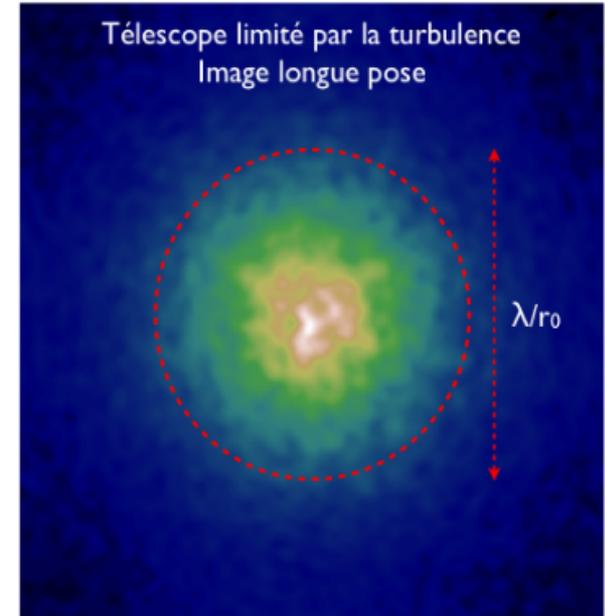
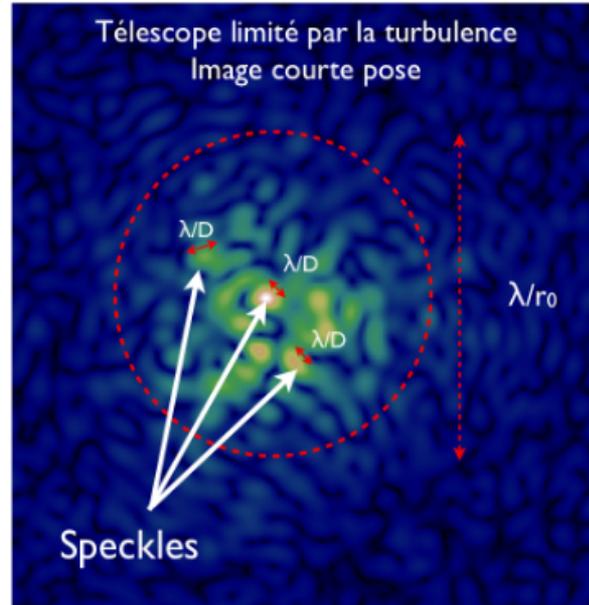
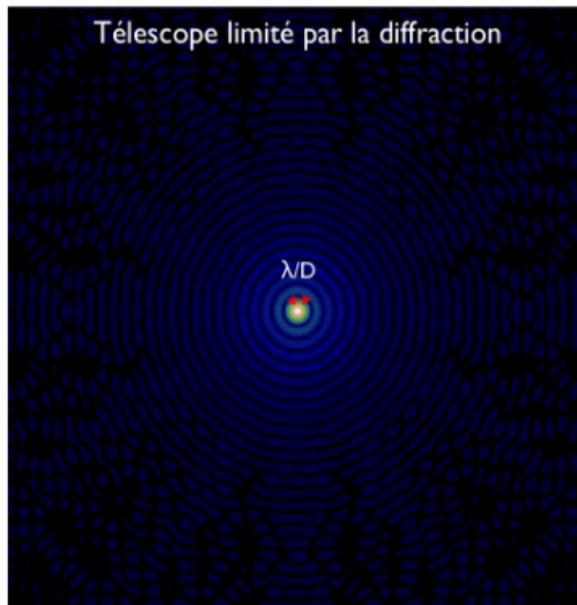
Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Rappels : effet de la turbulence atmosphérique sur l'image

Point spread function : image d'un point situé à l'infini



Vidal 2009

Objectif : retrouver la résolution λ / D en présence de turbulence

Ordres de grandeur

Résolution théorique d'un télescope : λ/D

Ex : $D = 10 \text{ m}$ à $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ $\rightarrow \lambda/D \sim$

Limite de résolution imposée par la turbulence :

seeing = λ/r_0 ($\propto \lambda^{-1/5}$) avec r_0 diamètre de Fried ($\propto \lambda^{6/5}$)

Ex : $r_0(0,5 \mu\text{m}) \sim 10 \text{ cm}$ \rightarrow à $0,5 \mu\text{m}$ seeing \sim
 \rightarrow à $2,2 \mu\text{m}$ seeing \sim

Temps de corrélation :

$\tau_0 = 0,314 r_0/v$ avec v vitesse moyenne transverse du vent

Ex : seeing $\sim 1 \text{ sec. d'angle}$ à $0,5 \mu\text{m}$ et $v = 10 \text{ m/s}$

\rightarrow à $0,5 \mu\text{m}$ $\tau_0 \sim$

\rightarrow à $2,2 \mu\text{m}$ $\tau_0 \sim$

Ordres de grandeur

Résolution théorique d'un télescope : λ/D

Ex : $D = 10 \text{ m}$ à $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ $\rightarrow \lambda/D \sim 0,01''$

Limite de résolution imposée par la turbulence :

seeing = λ/r_0 ($\propto \lambda^{-1/5}$) avec r_0 diamètre de Fried ($\propto \lambda^{6/5}$)

Ex : $r_0(0,5 \mu\text{m}) \sim 10 \text{ cm}$ \rightarrow à $0,5 \mu\text{m}$

seeing $\sim 1''$

\rightarrow à $2,2 \mu\text{m}$

seeing $\sim 0,8''$

Temps de corrélation :

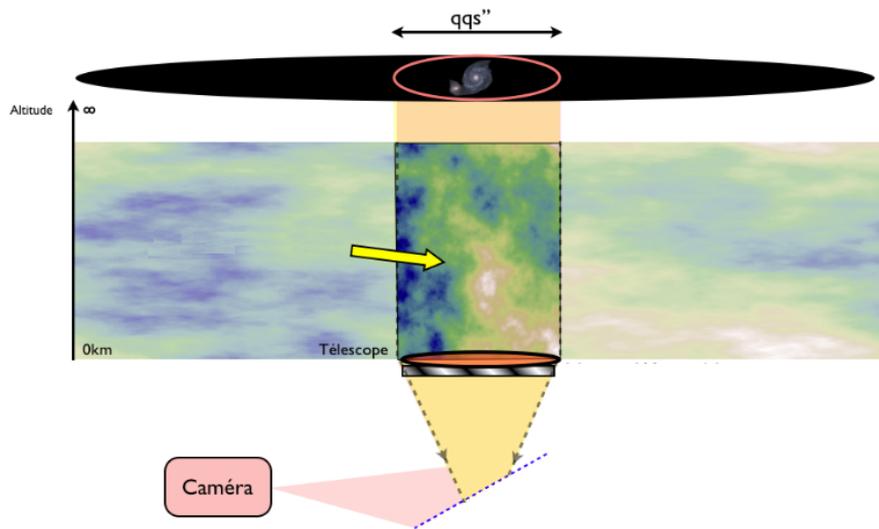
$\tau_0 = 0,314 r_0/v$ avec v vitesse moyenne transverse du vent

Ex : seeing $\sim 1 \text{ sec. d'angle}$ à $0,5 \mu\text{m}$ et $v = 10 \text{ m/s}$

\rightarrow à $0,5 \mu\text{m}$ $\tau_0 \sim 3 \text{ ms}$

\rightarrow à $2,2 \mu\text{m}$ $\tau_0 \sim 18 \text{ ms}$

Turbulence atmosphérique et formation d'image



Vidal 2009

Champ électrique incident sur la pupille d'entrée de l'instrument (au sol) :

- **effet dominant : fluctuations de la phase de l'onde**

- effet négligeable : fluctuations d'amplitude de l'onde (scintillation)

Fonction de transfert optique, **FTO, turbulente longue pose** :

$$\langle \tilde{S}(f) \rangle \simeq \exp\left(\frac{-1}{2} D_\phi(|\lambda f|)\right) T(f)$$

$T(f)$ = fct transfert du télescope (avec aberrations)
 $D_\phi(|\lambda f|)$ = fct de structure de la phase

Avec $D_\phi(|\vec{\rho}|) = \langle (\Phi(\vec{r}) - \Phi(\vec{r} + \vec{\rho}))^2 \rangle_{\vec{r}} \simeq 6,88 \left(\frac{|\vec{\rho}|}{r_0}\right)^5 \propto \lambda^{-2} \Rightarrow \Phi \propto \lambda^{-1}$

différence de marche
 ~ achromatique

Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

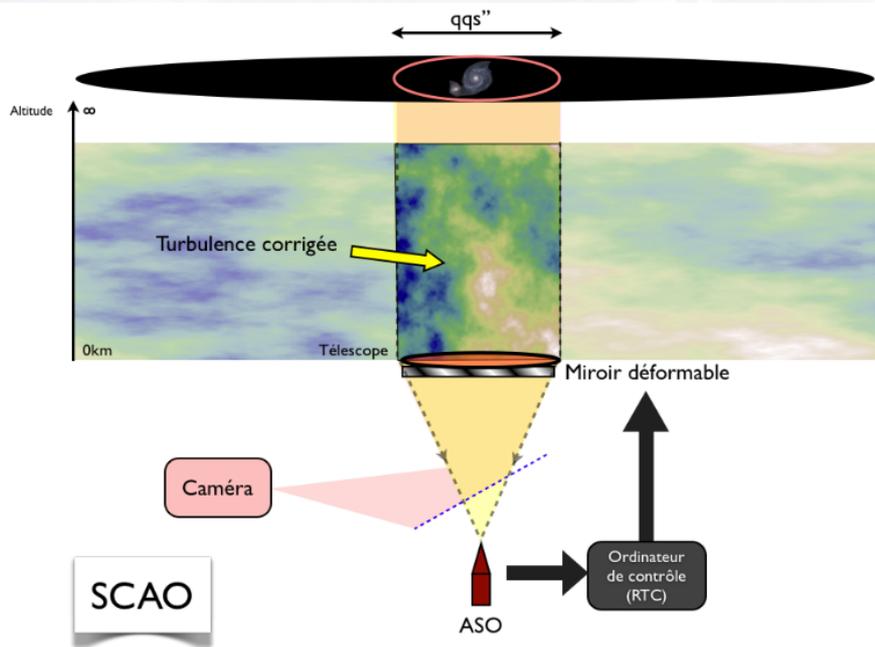
Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Principe de l'optique adaptative : SCAO



Vidal 2009

**Optique adaptative
=
Boucle de rétroaction**

Turbulence ajoute des **différences de marche quasi-achromatiques**

Optique adaptative compense ces différences de marche en temps réel :

- 1^{ère} étape : les mesurer → **analyse de surface d'onde (ASO)**
- 2^{ème} étape : les compenser → **contrôleur et correcteur optique**

Pour introduire des différences de marche achromatiques → **miroir déformable**

Miroirs déformables

Grande variété en taille, nombre actionneurs, technologie

- **Secondaire adaptatif Very Large Telescope (VLT)**

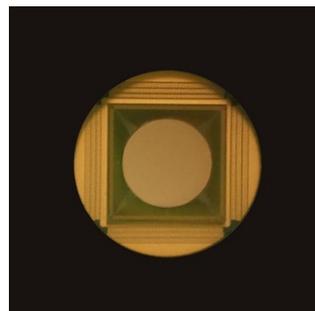
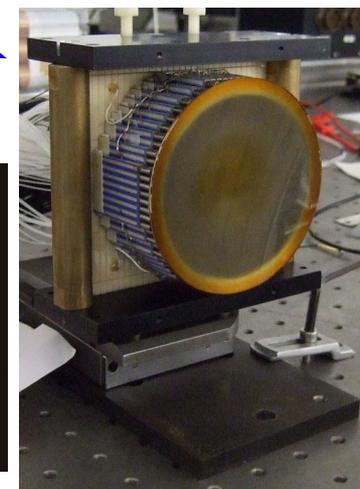
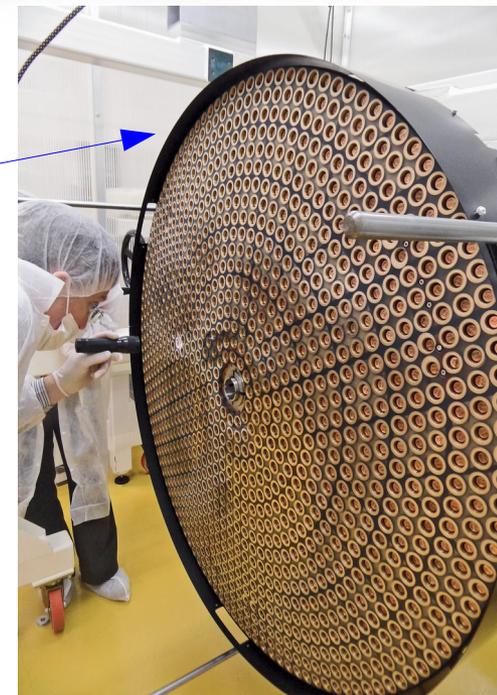
Ø~100cm 1170 act magnétique
course~45µm pas actionneur~30mm

- **Instrument Sphere/VLT**

Ø~20cm 1370 act piézoélectrique
course~10µm pas actionneur~4,5mm

- **Imagerie haute dynamique**

Ø~5cm 2304 act électrostatique
course~0,5µm pas actionneur~1mm



Lire l'article Photoniques_82_DM.pdf

Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Analyse de surface d'onde

Objectif : mesurer la phase du champ électrique → « la surface d'onde » (front d'onde)

Besoin : analyse à faire sur des objets ponctuels ou étendus de faible luminosité
=> utiliser une large bande spectrale si possible (pour le rapport signal à bruit)

Question 1

Où mesurer la phase : plan pupille ? plan focal ? Autre plan ?

- Optique adaptative « classique » → plutôt en plan pupille
- Imagerie haute dynamique → plutôt plan focal

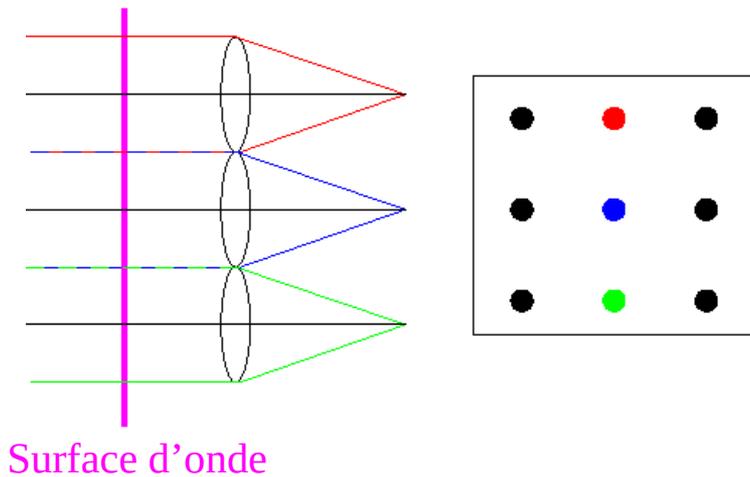
Question 2

En optique et infrarouge → mesure d'une intensité => comment mesurer la phase ?

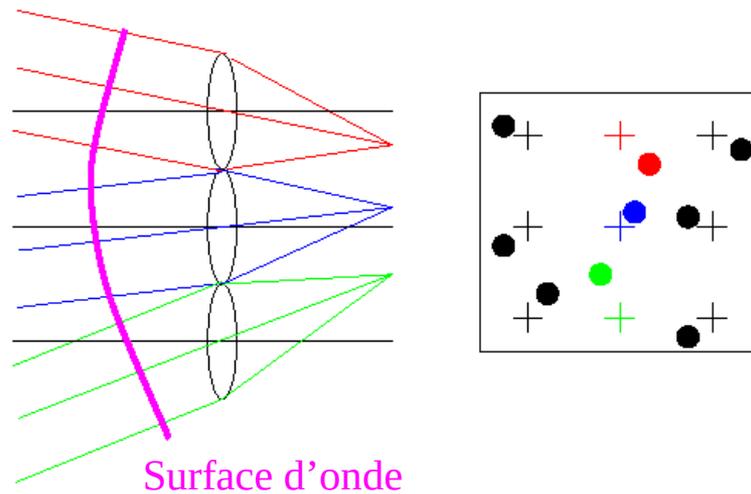
- Mesurer la dérivée première de la phase (Shack-Hartmann, pyramide, etc)
- Mesurer la dérivée seconde de la phase (courbure)
- Codage par des interférences spatiales ou temporelles

L'analyseur Shack-Hartmann

Principe : rayons de l'optique géométrique perpendiculaires à la surface d'onde



Sans aberrations



Avec aberrations

Déplacement du spot est proportionnel à la **dérivée première de la phase**

Reconstruction de proche en proche

$N \times N$ sous-pupilles \Rightarrow $N \times N$ points de mesure

Shack-Hartmann : la mesure

1) Centre de gravité (c_x, c_y) de chaque spot

$$c_x = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} - r_x \quad c_y = \frac{\sum_{i,j} y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} - r_y$$

$I_{i,j}$ = intensité du pixel $[i, j]$

$x_{i,j}$ et $y_{i,j}$ = coordonnées cartésiennes du pixel $[i, j]$

r_x et r_y = centre de gravité du spot sans aberration

2) Lien avec la phase

$$\left\langle \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right\rangle_{\text{sous pupille}} \simeq \frac{2\pi}{\lambda} \frac{c_x}{f} \quad \left\langle \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right\rangle_{\text{sous pupille}} \simeq \frac{2\pi}{\lambda} \frac{c_y}{f}$$

f = focale de la micro-lentille → ajuste sensibilité et dynamique

λ = longueur d'onde d'analyse

Shack-Hartmann : bruit de mesure (1/2)

$\sigma_{\Delta\Phi}^2$ = Variance de la différence de phase mesurée

1) Bruit de photons

$$\sigma_{\Delta\Phi}^2 \propto \frac{1}{n_{ph}} \left(\frac{\theta d}{\lambda} \right)^2$$

n_{ph} = nombre de photo-électrons dans la sous-pupille

d = diamètre de la sous-pupille

θ = largeur angulaire du spot

- λ / d si point source et limité par diffraction
- λ / r_0 si point source et limité par turbulence
- θ_{object} si objet étendu

2) Bruit de fond

$$\sigma_{\Delta\Phi}^2 \propto \frac{n_{bg}}{n_{ph}^2} \left(\frac{\theta d}{\lambda} \right)^2$$

n_{bg} = nombre de photo-électrons de fond dans la sous-pupille

Shack-Hartmann : bruit de mesure (2/2)

$\sigma_{\Delta\Phi}^2$ = Variance de la différence de phase mesurée à la longueur d'onde d'analyse

1) Bruit de photons

$$\sigma_{\Delta\Phi}^2 = \frac{\pi^2}{2n_{ph}} \left(\frac{N_T}{N_D} \right)^2$$

n_{ph} = nombre de photo-électrons dans la sous-pupille

N_T = largeur à mi-hauteur du spot en nombre de pixels

N_D = largeur à mi-hauteur du spot limité par la diffraction en nombre de pixels

2) Bruit de fond

$$\sigma_{\Delta\Phi}^2 = \frac{\pi^2}{3} \frac{\sigma_e^2 N_S^2}{n_{ph}^2} \left(\frac{N_S}{N_D} \right)^2$$

σ_e = écart-type du bruit de détecteur en photo-électron par pixel et par trame

N_S = largeur de la fenêtre de calcul du centre de gravité en pixels (généralement $N_S \simeq 2 N_T$)

Exercice : Shack-Hartmann pour l'ELT

Le système d'optique adaptative derrière un télescope de 30m de diamètre pointe une étoile guide de magnitude $m_V=10$.

L'analyseur divise le faisceau en $N_{\text{souspup}}=1200$ sous-pupilles. La transmission des optiques de l'entrée du télescope au détecteur de l'analyseur est $T_{\text{tel}}=50\%$. Ce détecteur utilise une bande spectrale de $\Delta\lambda = 0,4\mu\text{m}$, son rendement quantique est $q_{\text{det}}=80\%$ et son bruit d'écart-type $\sigma_e = 3e^-/\text{pixel}$. On choisit un temps de pose de $\Delta t=1,5\text{ms}$. Le calcul pour chaque sous-pupille se fait sur deux fois le diamètre de la diffraction et chaque spot fait deux pixels de large.

Quel Strehl obtient-on en ne considérant que l'erreur de l'analyseur ?

Rappel : $\log_{10}(n_{\text{ph}}) = -0.4 m_V + 3$ avec n_{ph} en nombre de photon par cm^2 et par Angström

Exercice : Shack-Hartmann pour l'ELT

Le système d'optique adaptative derrière un télescope de 30m de diamètre pointe une étoile guide de magnitude $m_V = 10$.

L'analyseur divise le faisceau en $N_{\text{souspup}} = 1200$ sous-pupilles. La transmission des optiques de l'entrée du télescope au détecteur de l'analyseur est $T_{\text{tel}} = 50\%$. Ce détecteur utilise une bande spectrale de $\Delta\lambda = 0,4\mu\text{m}$, son rendement quantique est $q_{\text{det}} = 80\%$ et son bruit d'écart-type $\sigma_e = 3e^-/\text{pixel}$. On choisit un temps de pose de $\Delta t = 1,5\text{ms}$. Le calcul pour chaque sous-pupille se fait sur deux fois le diamètre de la diffraction et chaque spot fait deux pixels de large.

Quel Strehl obtient-on en ne considérant que l'erreur de l'analyseur ?

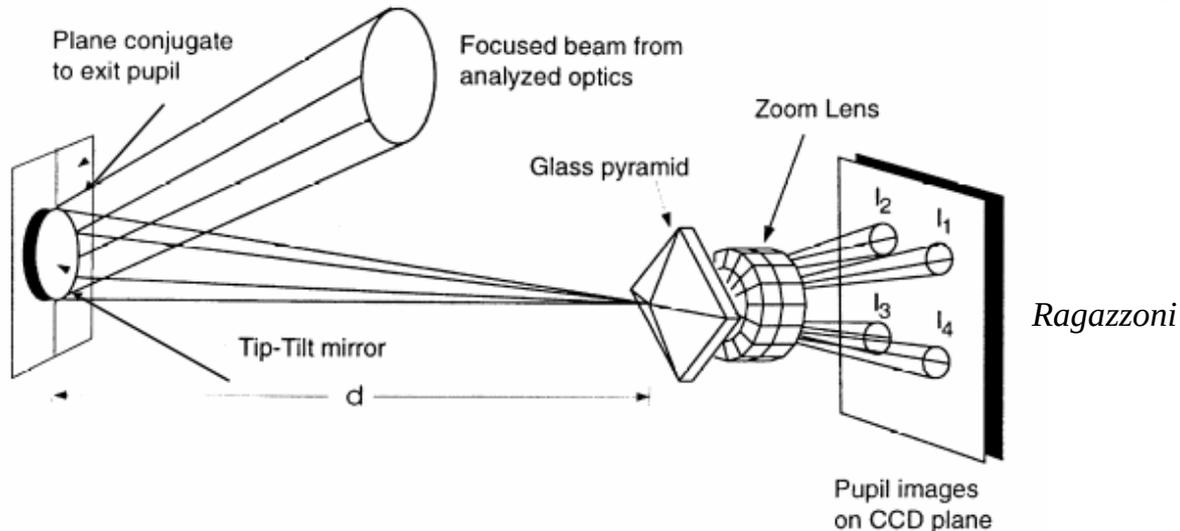
Rappel : $\log_{10}(n_{\text{ph}}) = -0,4 m_V + 3$ avec n_{ph} en nombre de photon par cm^2 et par Angström

Réponse

$$n_{\text{ph}} = 10^{(-0,4 m_V + 3)} * T_{\text{tel}} * q_{\text{det}} * \Delta\lambda * \pi * \frac{D^2}{4} * \Delta t * \frac{1}{N_{\text{souspup}}} \quad N_S = 2 N_D$$

$$\sigma_{\Delta\Phi}^2 = \frac{\pi^2}{3} \frac{\sigma_e^2 N_S^2}{n_{\text{ph}}^2} \left(\frac{N_S}{N_D} \right)^2 = 0,34 \quad \Rightarrow \quad SR \simeq 66\%$$

L'analyseur pyramide

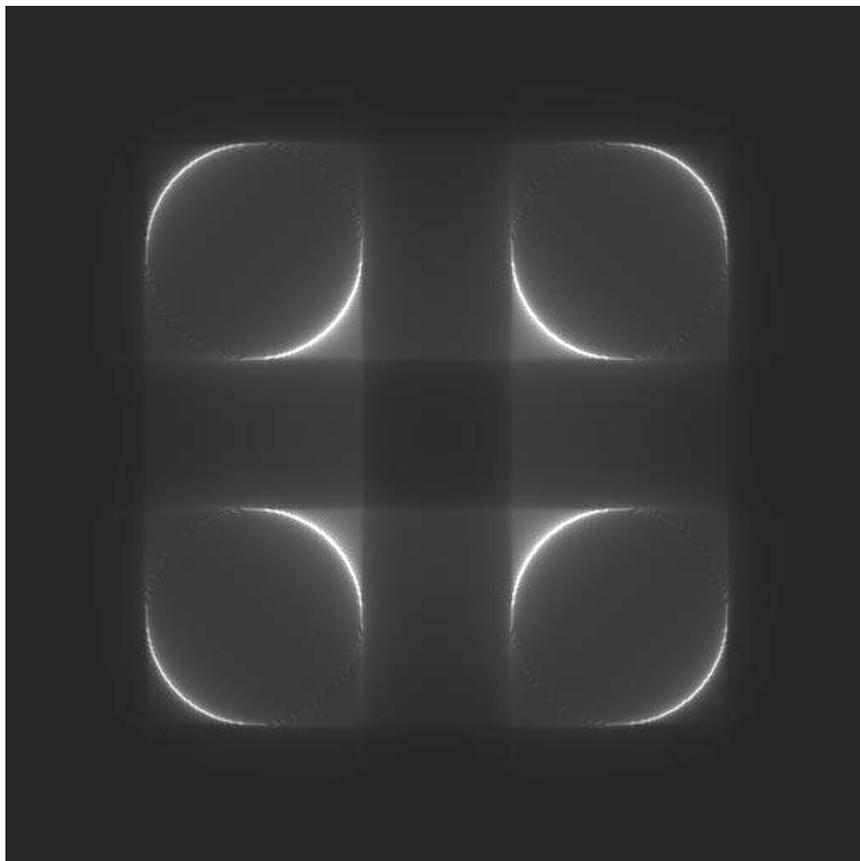


- Pyramide de verre forme 4 images de la pupille sur le détecteur $\{I_i\}_{1 \leq i \leq 4}$
- Modulation θ_{mod} de la position angulaire du spot sur la pyramide
 - $\theta_{mod} \sim \lambda / r_0$: linéarité pour tous les ordres
 - $\theta_{mod} \sim \lambda / D$: gde sensibilité aux bas ordres mais non linéarité aux hauts ordres

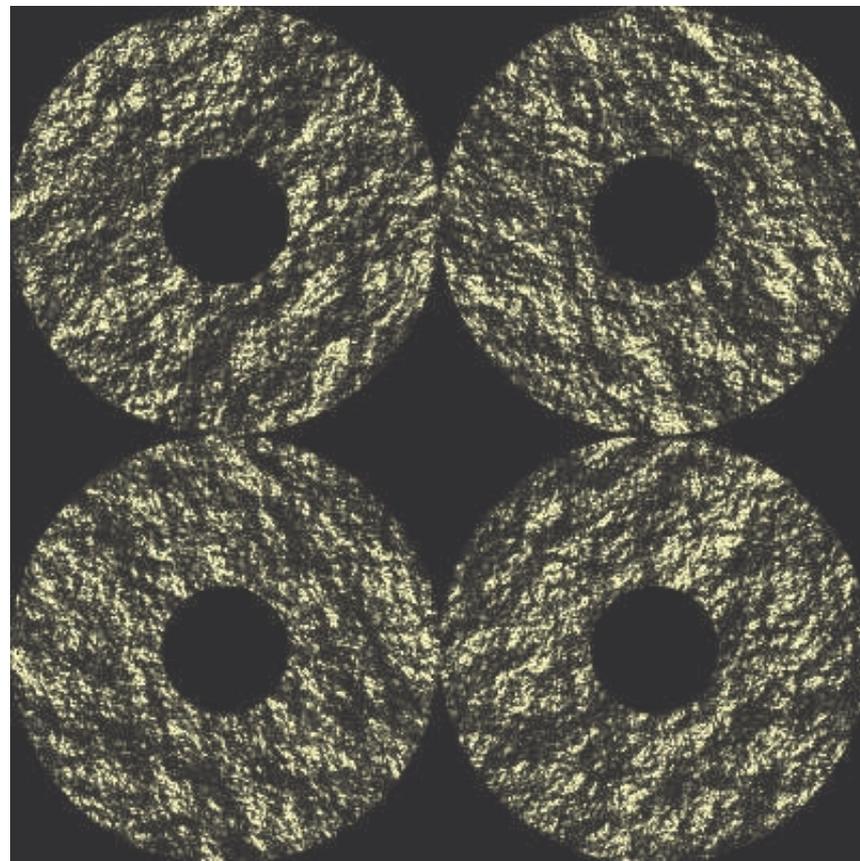
Si $\theta_{mod} > \frac{\lambda}{2\pi} \text{Max}_{pupille} \left(\left| \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right| \right)$ alors $\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\pi^2 \theta_{mod}}{\lambda} \frac{I_1 + I_4 - I_2 - I_3}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}$

L'analyseur pyramide : exemple d'images

Effets de la diffraction
Aucune aberration



En présence de turbulence



Analyseurs Shack-Hartmann et pyramide

Par principe :

- Achromatique
- Bande spectrale très large (celle du détecteur)
- Objets étendus (très étendus pour un SH → Soleil)
- Très grande sensibilité
- Peu sensible à la scintillation

Caractéristiques instrumentales :

- Utilisation de CCD très faible bruit à haut rendement quantique
- 4 pixels minimum par sous pupille
- Ajustement de la dynamique ou sensibilité (focale, modulation)

Reconstruction de la surface d'onde

Objectif : **trouver la phase Φ** en fonction des mesures m

Mesures m = phase ou dérivées première ou seconde de la phase

1/ **Étalonner l'optique adaptative**

Relation théorique : $m = D_\phi \Phi + \varepsilon$ avec D_ϕ matrice d'interaction et ε le bruit

→ **approche zonale**, par discrétisation $\Phi = \Phi_{i,j}$ (i et j les numéros de pixels)

→ **approche modale**, décomposition sur une base $\{Z_i\}$: $\Phi = \sum_i q_i Z_i(\vec{r})$

2/ **Inverser le problème**

On cherche la matrice de reconstruction B_ϕ : $\Phi = B_\phi m$

→ moindres carrés, maximum a posteriori, variance de phase minimale, etc

Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

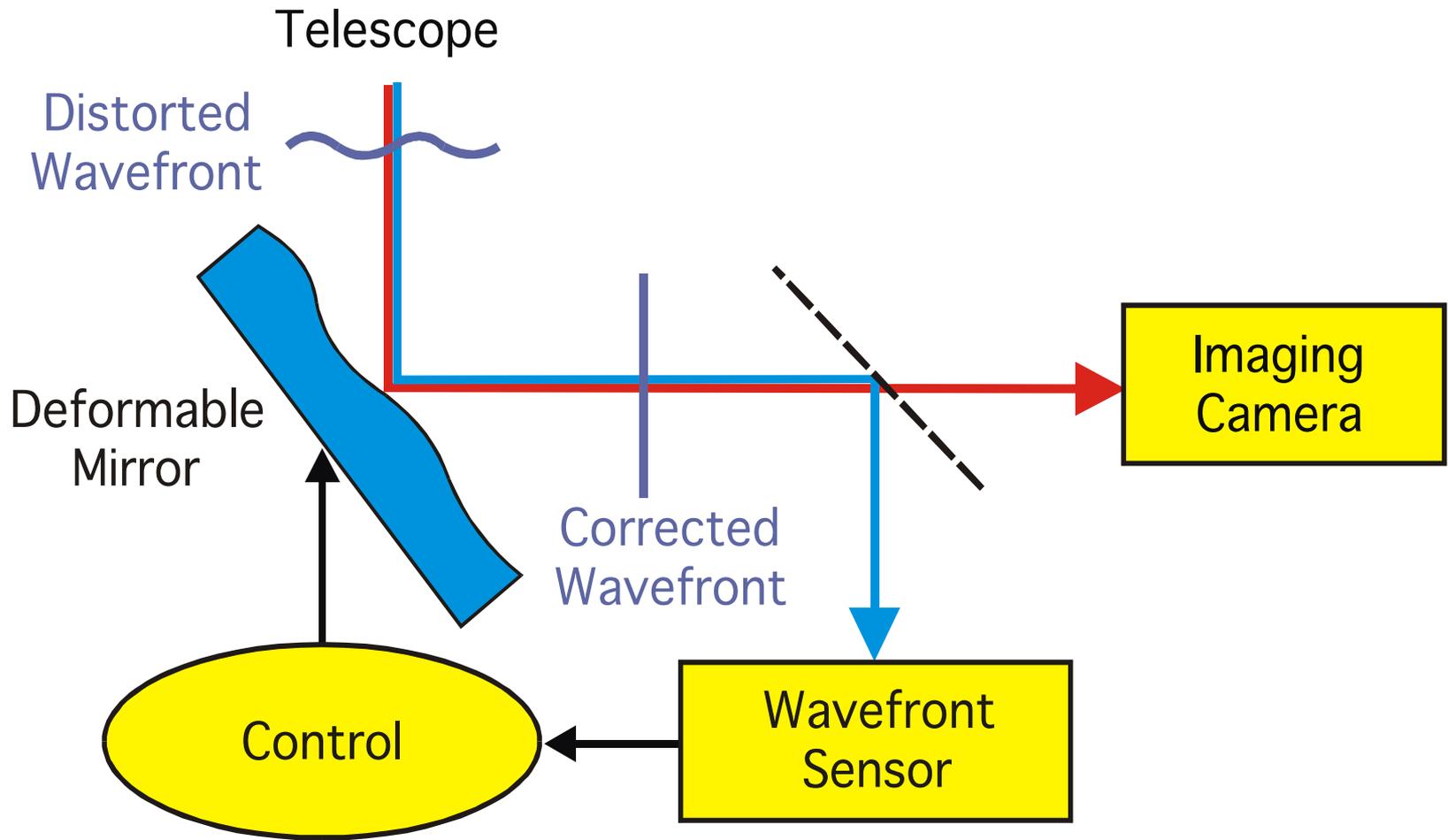
Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Schéma d'une optique adaptative



Étalonnage de la boucle d'optique adaptative

Objectif : **trouver les commandes DM** en fonction des mesures m

Mesures m = phase ou dérivées première ou seconde de la phase

1/ Lien entre phase et commandes DM → matrice d'interaction

$\Phi = A C$ avec C les commandes DM et A la matrice d'interaction du DM

Et avec $m = D_{\phi} \Phi + \varepsilon$:

$m = D C + \varepsilon$ avec D matrice d'interaction en commande et ε le bruit

Rq : $D = D_{\phi} A$

2/ Inverser le problème → matrice de commande

On cherche la matrice de commande B : $C = B m$

→ moindres carrés, maximum a posteriori, variance de phase minimale, etc

Mesure de la matrice d'interaction

Objectif : Que mesure l'analyseur quand on bouge un des degrés de liberté du correcteur ?

Matrice d'interaction = relation entre miroir déformable et analyseur de surface d'onde

- **Étalonnage crucial** : connaître l'impact d'un maximum de paramètres (décalage latéral, rotation, grandissement, sensibilité de l'analyseur, gain des actionneurs, etc).

- Procédure

- **Modifier chaque degré de liberté un à un** → ex : on pousse uniquement l'actionneur k
- Enregistrer la mesure l'analyseur → vecteur m_k
- Répéter l'opération pour tous les degrés de liberté
- Construire la matrice d'interaction D à partir des mesures m_k

$$D = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{p1} & m_{p2} & \cdots & m_{pn} \end{pmatrix}$$

- Pour un vecteur C de tensions envoyé au miroir déformable la mesure est alors : $m = D C$

Matrice de commande

Généralement, plus de mesures m_i que d'inconnues C_j

Minimisation d'un critère des moindres carrés : distance aux mesures m

$$e = \|m - DC\|^2 = \sum_i \left(m_i - \sum_j D_{i,j} C_j \right)^2$$

Minimiser $e \Rightarrow$ dérivées de e par rapport à C_j nulles

$$\Rightarrow C = (D^t D)^{-1} D^t m \quad (D^t D)^{-1} D^t = \text{matrice inverse généralisée}$$

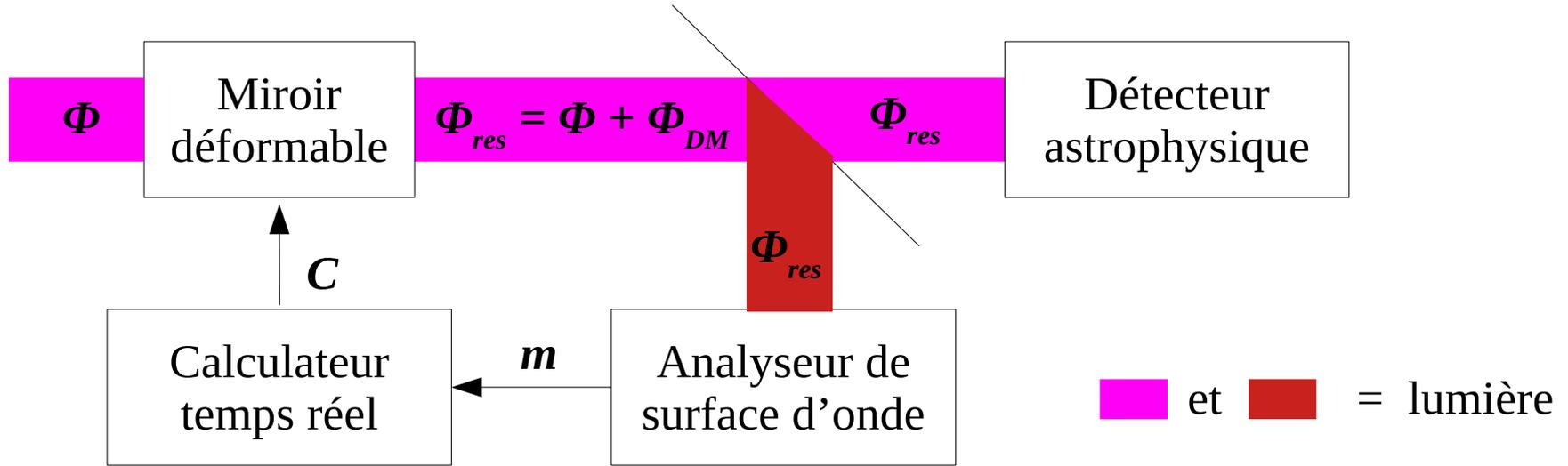
Mais $D^t D$ n'est pas toujours inversible car modes non mesurés par l'analyseur (piston, gauffre, etc)

Décomposition de $D^t D$ en valeurs propres, pseudo-inverse : $D^t D = U \Lambda U^t$

Commande C du DM qui reproduit au mieux m : $C = B m = U \Lambda^{*-1} U^t D^t m$

Jamais parfait car nombre fini d'actionneurs ! \rightarrow coupure en fréquences spatiales

Commande temporelle et commande spatiale



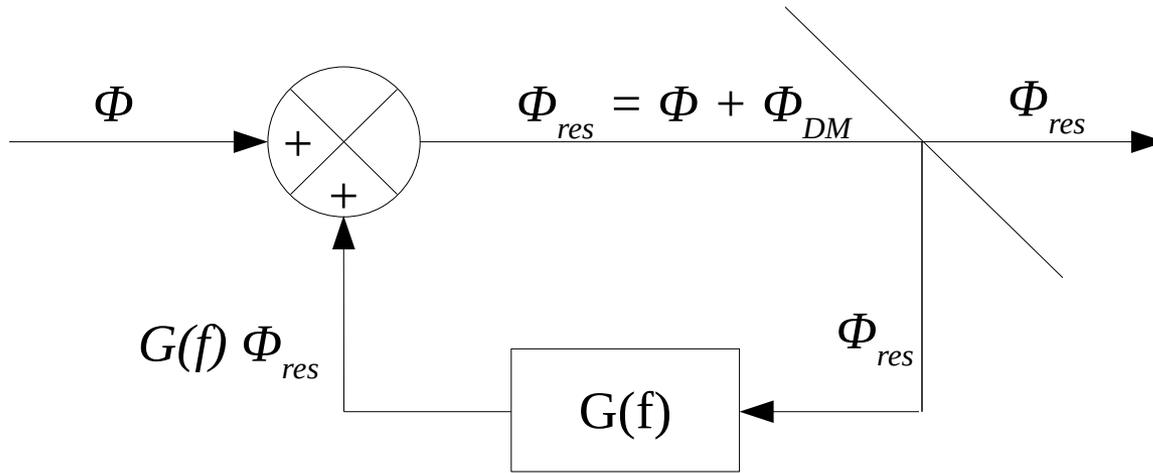
$$C(t + dt) = C(t) + g B m(t)$$

$g = \text{gain de l'intégrateur temporel}$

Commande temporelle

Commande spatiale

Fonction de transfert temporelle de l'optique adaptative

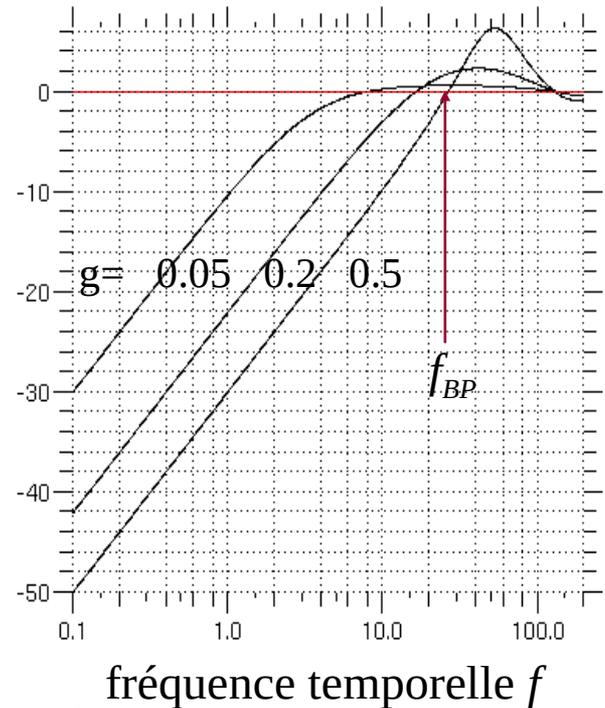


$$\begin{cases} \Phi_{res}(f) = \Phi(f) + \Phi_{DM}(f) \\ \Phi_{DM}(f) = G \Phi_{res}(f) \end{cases}$$

Fonction de transfert boucle ouverte

$$\Phi_{res}(f) = \Phi(f) \frac{1}{1+G(f)}$$

Fonction de transfert de réjection



f_{BP} = fréquence de coupure croît avec le gain de la boucle mais attention à l'overshoot

Fonction de transfert temporelle de l'OA : caractéristiques

Fonction de transfert en boucle ouverte $G(f)$ est caractérisée essentiellement par :

- un retard pur (entre la mesure et la correction)
- un intégrateur
- un gain ajustable g

Prévoir un rapport ~ 10 entre la fréquence d'échantillonnage et la fréquence de coupure réelle

Variance de phase résiduelle uniquement due aux effets temporels

$$\sigma_{temp}^2 = 0,243 \left(\frac{v}{r_0} \right)^{(5/3)} f_{BP}^{-5/3} \quad \text{avec } v \text{ la vitesse moyenne du vent}$$

Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Un critère de performance : le Strehl

Rapport de Strehl (SR), calculé sur des longues poses

$$SR = \frac{\text{Max}(PSF \text{ with phase})}{\text{Max}(PSF \text{ without phase})} \leq 1$$

$$SR = \frac{\int FTO(\vec{f}) d\vec{f}}{\int FTO_{no \text{ phase}}(\vec{f}) d\vec{f}}$$

Si télescope sans obstruction centrale : *PSF without phase* = tache d'Airy

$$SR \simeq \exp(-\sigma_\phi^2) \simeq 1 - \sigma_\phi^2 \quad \text{si } \sigma_\phi^2 \ll 1 \text{ rad}^2$$

Avec σ_ϕ la variance spatiale de la phase dans la pupille

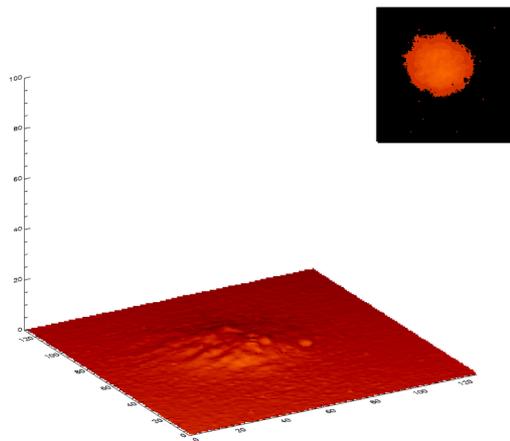
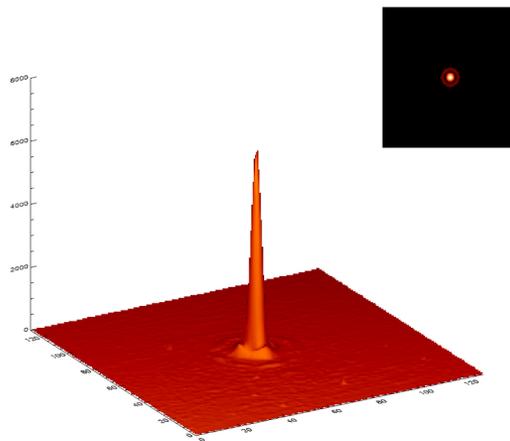
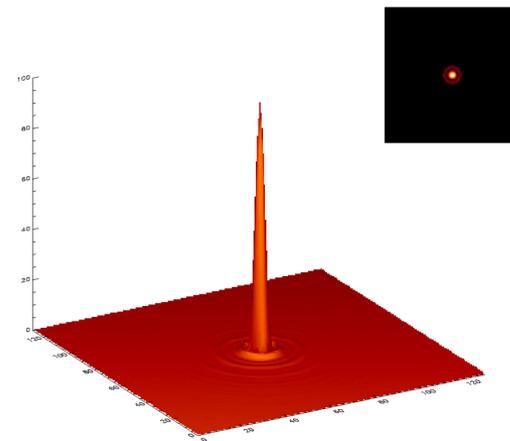


image turbulente

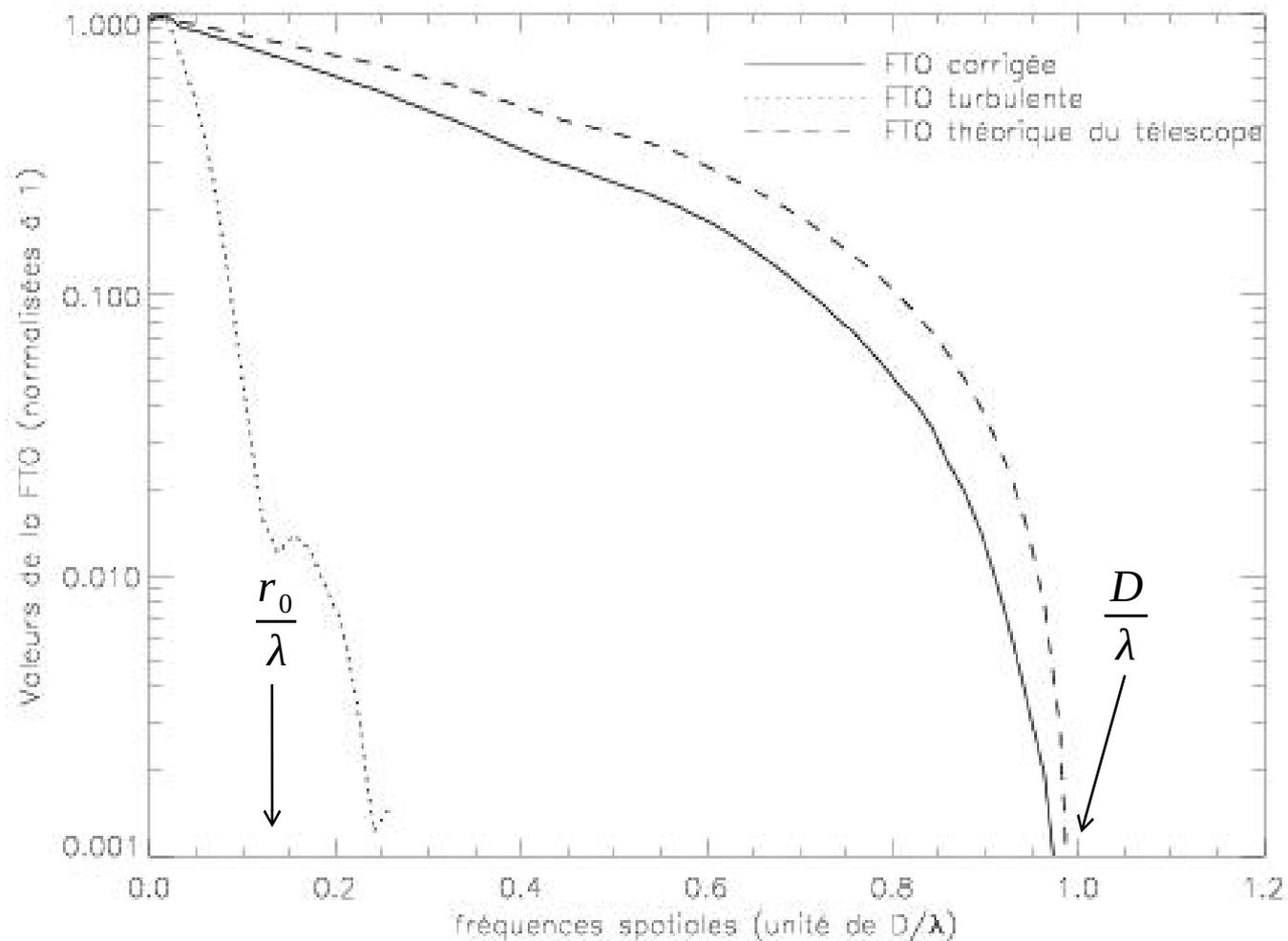
image corrigée ($SR = 64\%$)Longueur d'onde d'imagerie : $2.2\mu m$ 

tâche d'Airy

Turbulence : $r_o = 1m$ à $2.2\mu m$, vitesse de vent = $10m/s$, télescope : $D = 8m$

Système (NAOS) : 144 sous-pupilles, 185 actionneurs, $500Hz$ de fréquence

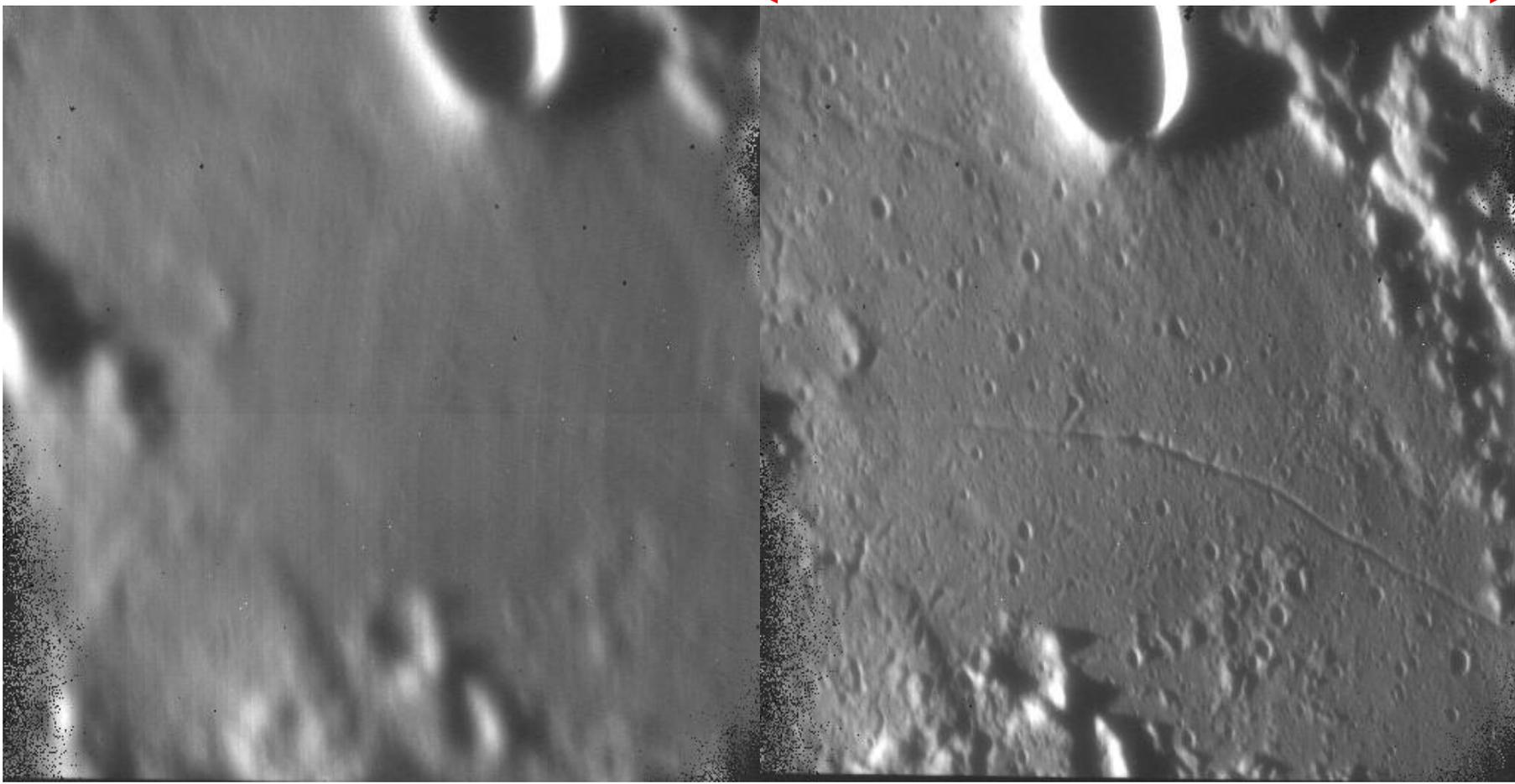
Fonction de transfert optique



Optique adaptative : information spatiale restituée jusqu'à D / λ

Surface de la Lune à $\lambda = 2,3\text{microns}$ (NAOS)

26'' = 45 km



Sans OA

Avec OA

1/ Exprimer le besoin en rapport de Strehl : $SR \simeq \exp(-\sigma_\Phi^2)$

2/ Équilibre le budget d'erreur

$$\sigma_\Phi^2 = \underbrace{\sigma_{fit}^2 + \sigma_{aliasing}^2}_{\text{Erreur spatiale ultime}} + \sigma_{temp}^2 + \underbrace{\sigma_{noise}^2 + \sigma_{aniso}^2}_{\text{Limitations fondamentales}} + \sigma_{calib}^2 + \sigma_{aber}^2$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Erreur totale de boucle}}$

$\underbrace{\hspace{20em}}_{\text{Erreur totale sur l' image}}$

Sous-échantillonnage spatial de la surface d'onde	$\sigma_{fit}^2 \simeq \mu N_{act}^{-5/6} \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3}$	$0,2 < \mu < 0,5$
Repliement	$\sigma_{aliasing}^2$	
Temporel dû à la fréquence de coupure finie	$\sigma_{temp}^2 = 0,243 \left(\frac{v}{r_0}\right)^{5/3} f^{-5/3}$	
Bruit de mesure	σ_{noise}^2	
Anisoplanétisme	σ_{aniso}^2	
Calibration du système d'OA	σ_{calib}^2	
Aberrations non vues par le système d'OA	σ_{aber}^2	

Attention à la longueur d'onde pour les calculs du SR (voie astrophysique) et des variances (voie OA)

Combien d'actionneurs ?

On veut $SR = 78 \%$ à $0,5\mu\text{m}$. Combien faut-il d'actionneurs au DM ?
 $D=8\text{m}$ et $r_0=10\text{cm}$ à $0,5\mu\text{m}$

Même question pour $2,2\mu\text{m}$.

Combien d'actionneurs ? (solution)

On veut $SR = 78\%$ à $0,5\mu\text{m}$. Combien faut-il d'actionneurs au DM ?
 $D=8\text{m}$ et $r_0=10\text{cm}$ à $0,5\mu\text{m}$

Même question pour $2,2\mu\text{m}$.

$$\sigma_{fit}^2 \simeq \mu N_{act}^{-5/6} \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \Rightarrow N_{act} = \left(\frac{\mu}{\sigma_{fit}^2} \right)^{6/5} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \Rightarrow N_{act} = \left(\frac{\mu}{-\log SR} \right)^{6/5} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2$$

$$\mu = 0,257 \Rightarrow N_{act} = 6665 \quad @ 0,5 \mu\text{m}$$

$$N_{act} = \left(\frac{\mu}{-\log SR} \right)^{6/5} \left(\frac{D}{r_0 (\lambda/0,5)^{(6/5)}} \right)^2 \Rightarrow N_{act} = 190 \quad @ 2,2 \mu\text{m}$$

Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Very Large Telescope (VLT), Paranal, Chili



The New Set at Paranal - The VLT, the VST Dome and the AT1

ESO PR Photo 02d/04 (30 January 2004)

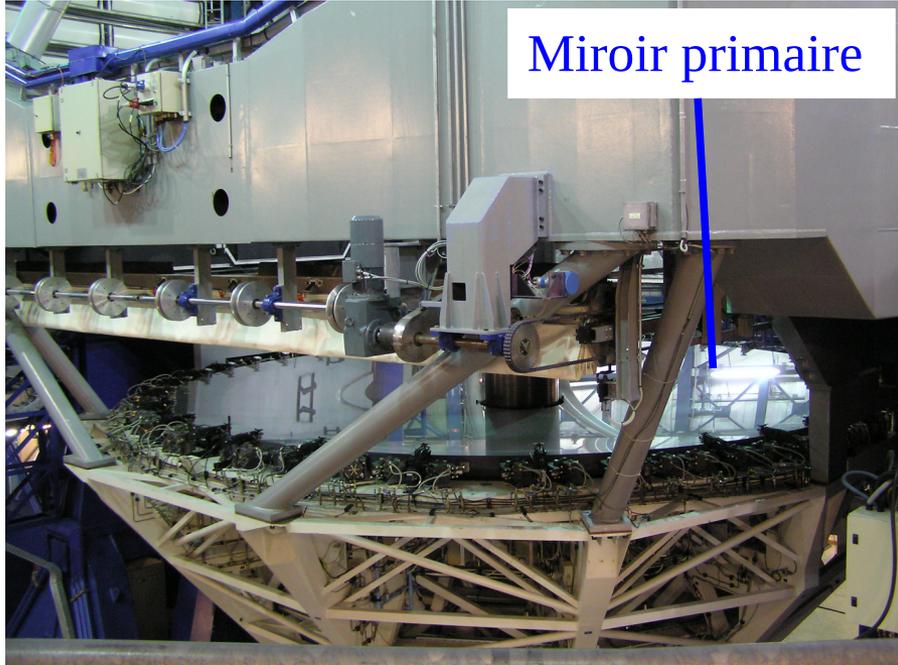
© European Southern Observatory



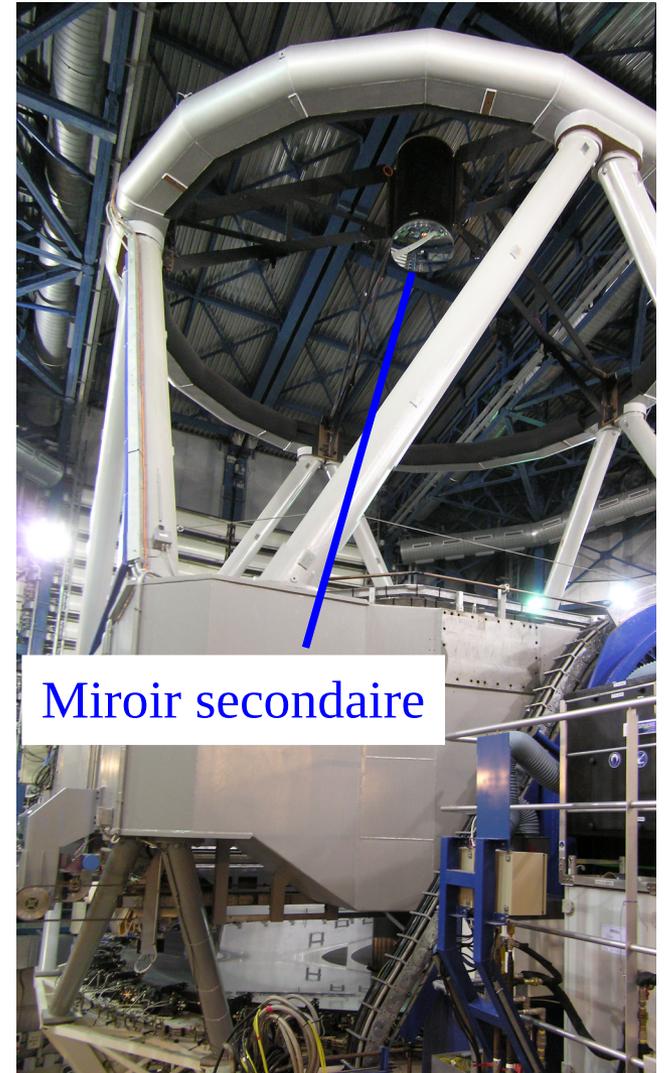
4 télescopes optiques de 8m de diamètre



Un des télescopes de 8m du VLT



Miroir primaire



Miroir secondaire



Plateforme Nasmyth

NAOS en quelques chiffres

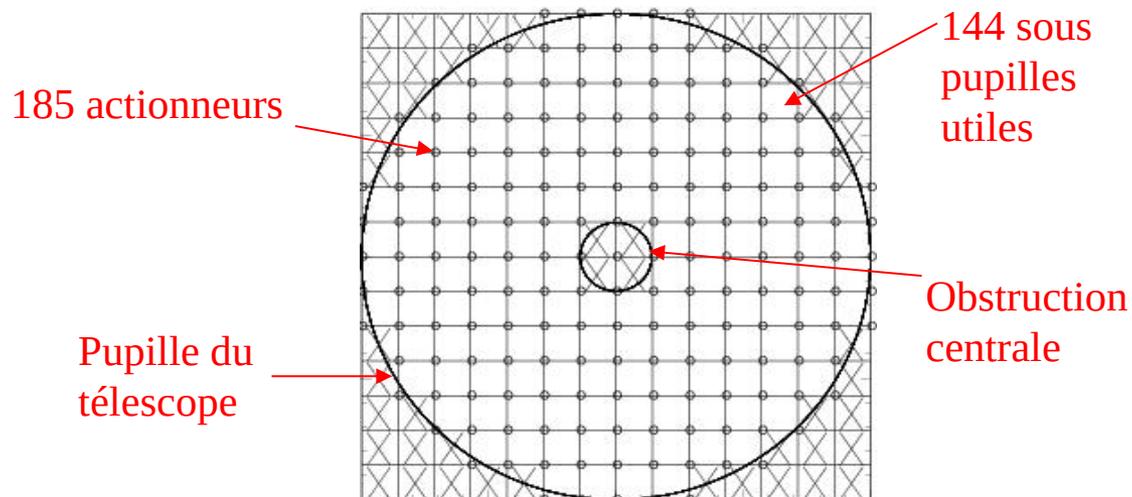
Miroir déformable : 185 actionneurs

Miroir de pointage (tip-tilt) de résolution 2,1mas sur le ciel

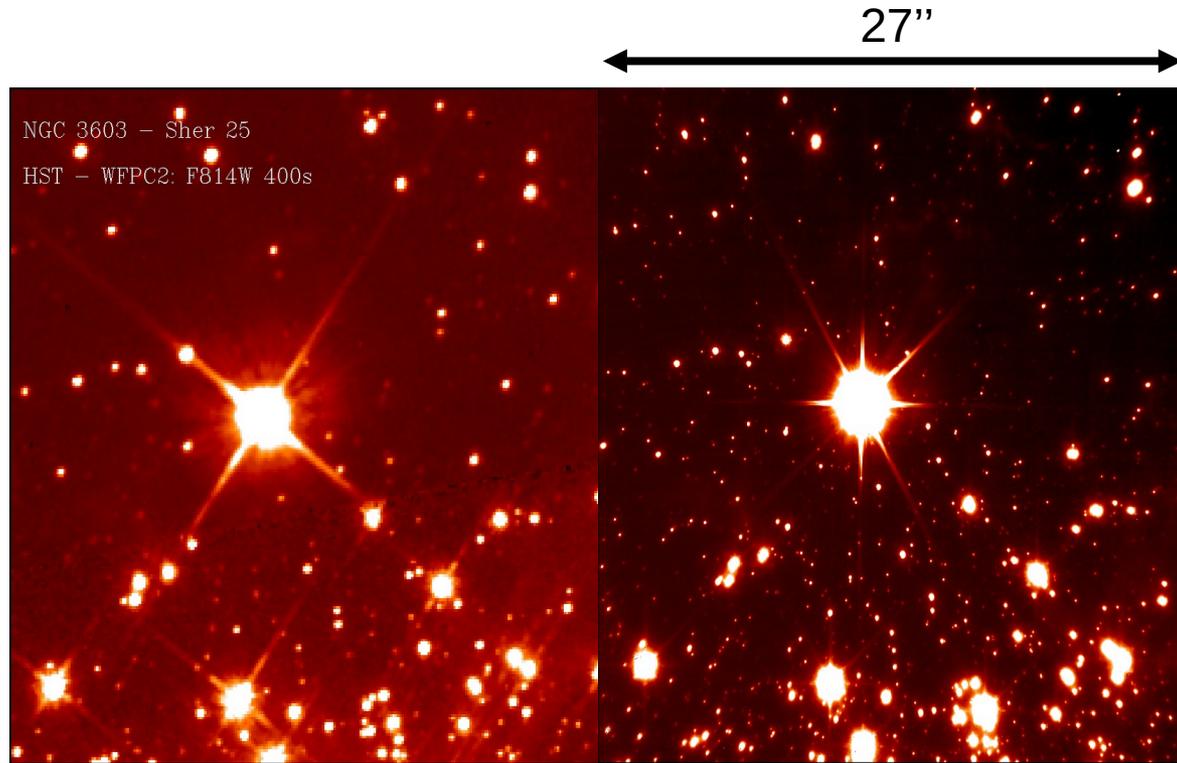
Deux analyseurs de surface d'onde de type Shack-Hartmann

- Visible 0,45 à 1,00 μm , 144 sous-pupilles
- Infra-rouge 0,80 à 2,50 μm , 36 sous-pupilles

Champ de l'étoile guide : 2 arcmin



NACO / VLT : un exemple de performance



Eso

HST/WFPC
I, 400s

VLT/NACO
Ks, 300s
27 mas /pix
Sr: 56%

SAXO / SPHERE en quelques chiffres

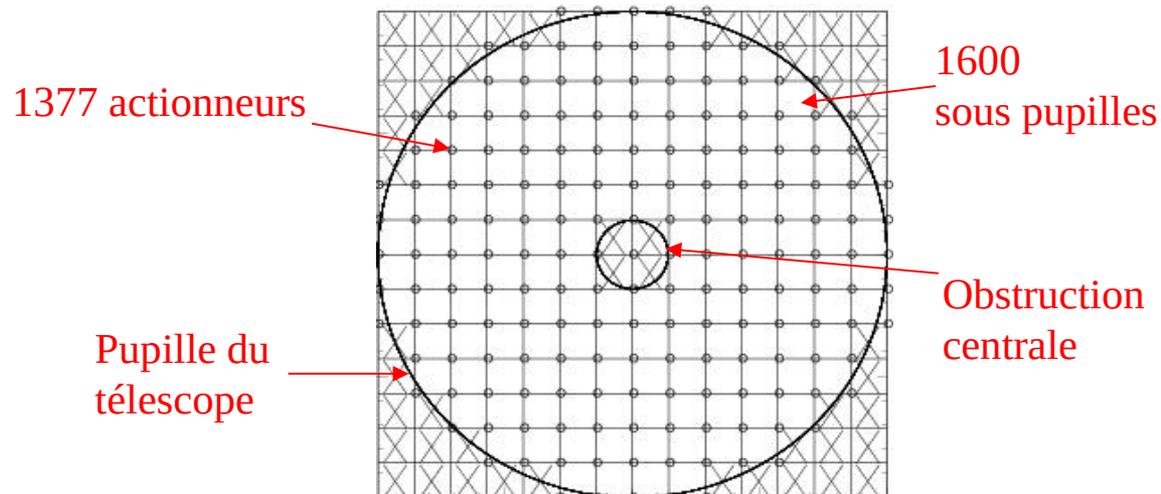
Miroir déformable : 1377 actionneurs @ 1,2kHz

Miroir de pointage (tip-tilt) de résolution 2,1mas sur le ciel

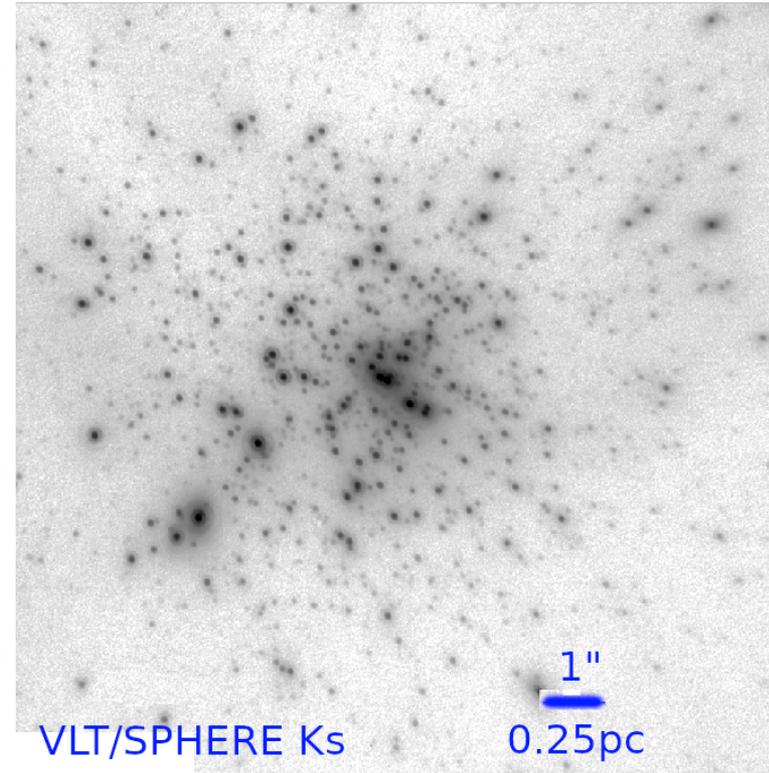
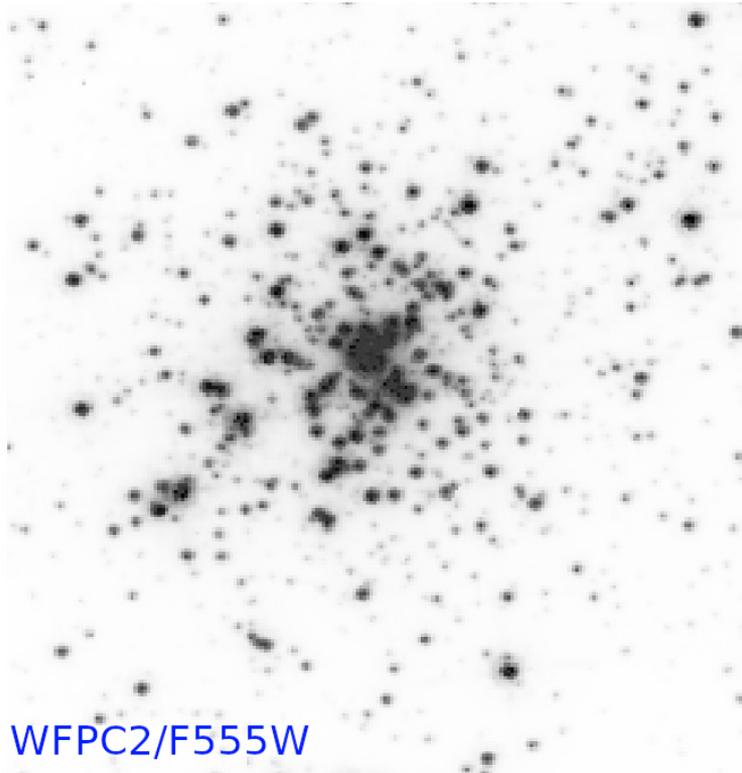
Analyseur de surface d'onde de type Shack-Hartmann

Visible 0,4 à 0,8 μm , 40x40 sous-pupilles

H band SR > 0,90 pour conditions médianes (0,8'' – 1,2'') et étoile brillante ($R < 9$)



Observations de R136 (amas stellaire)



Khorrami et al. 2017

Ici le Strehl est un bon critère mais ce n'est pas toujours vrai ! → imagerie haute dynamique

Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Limites fondamentales de la SCAO

Limite fondamentale de la single conjugated adaptive optics (SCAO) :

- **Luminosité de l'objet utilisé par l'analyseur**

→ magnitude de l'étoile guide : couverture du ciel

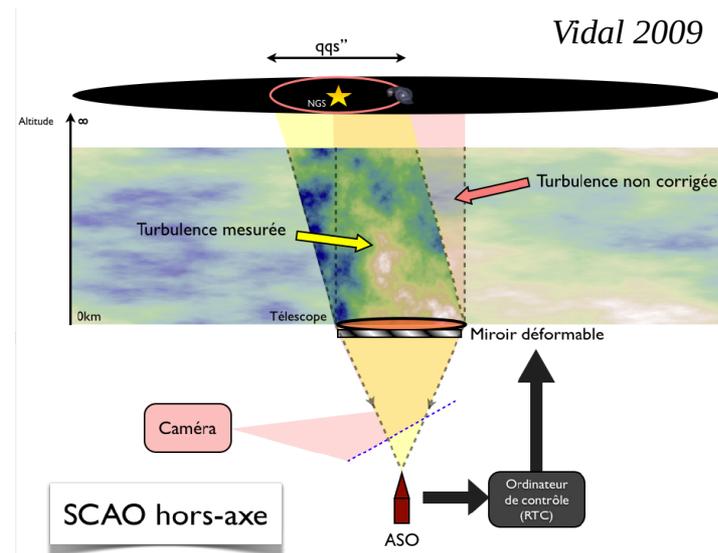
- Décorrélation angulaire de la surface d'onde (**anisoplanétisme**)

→ angle d'isoplanétisme (conditions moyennes)

3'' à $0,5 \mu\text{m}$

18'' à $2,2 \mu\text{m}$

→ **Couverture du ciel avec NGS et SCAO : qq %**



Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Les étoiles guides laser (LGS)

Analyseur pointe une étoile artificielle

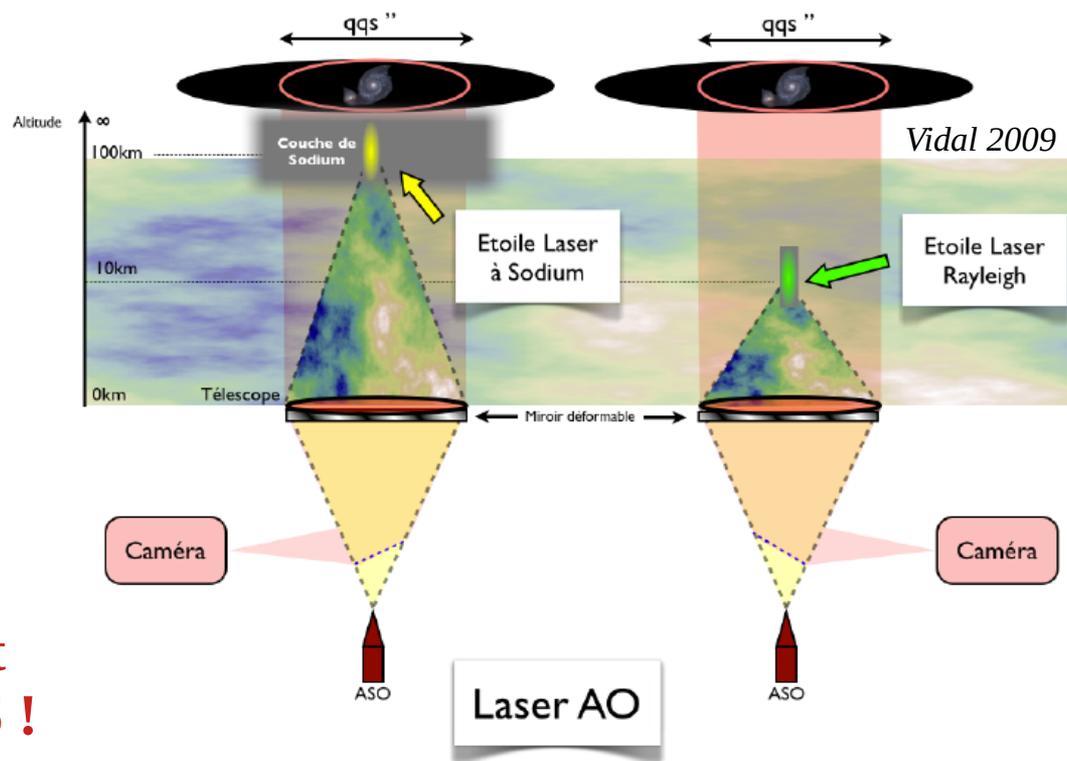
→ excitation des molécules de l'atmosphère par un laser

Couverture du ciel ~ 100 %

Mais

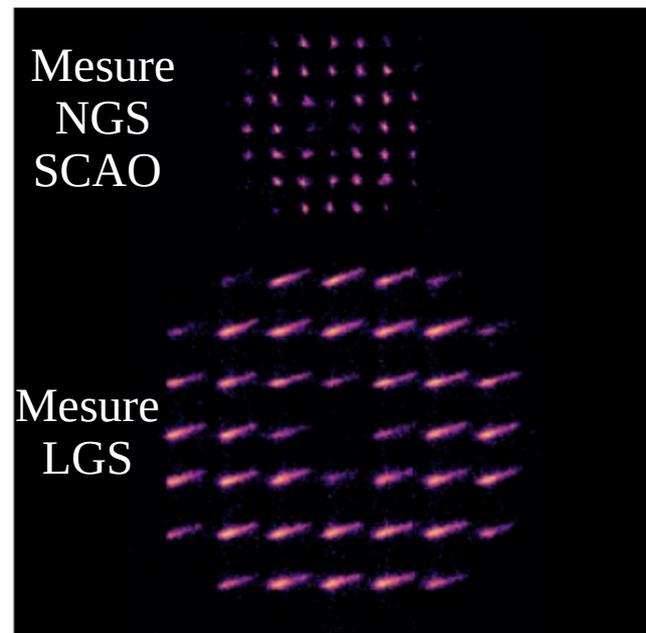
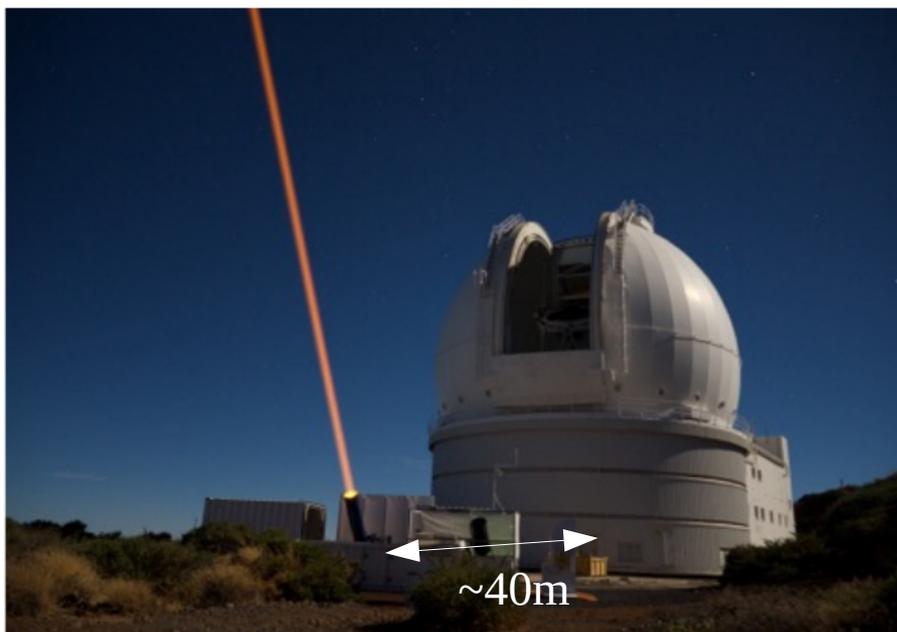
- **Effet de cône**
- **Source non ponctuelle**
- **Pas de mesure du tip-tilt**
- **Atmosphère non statique**

1 étoile naturelle (NGS) est toujours mieux qu'une LGS !



Les étoiles guides laser (LGS) : élongation des spots

Projet Canary : expérience pour simuler élongation des spots sur l'ELT

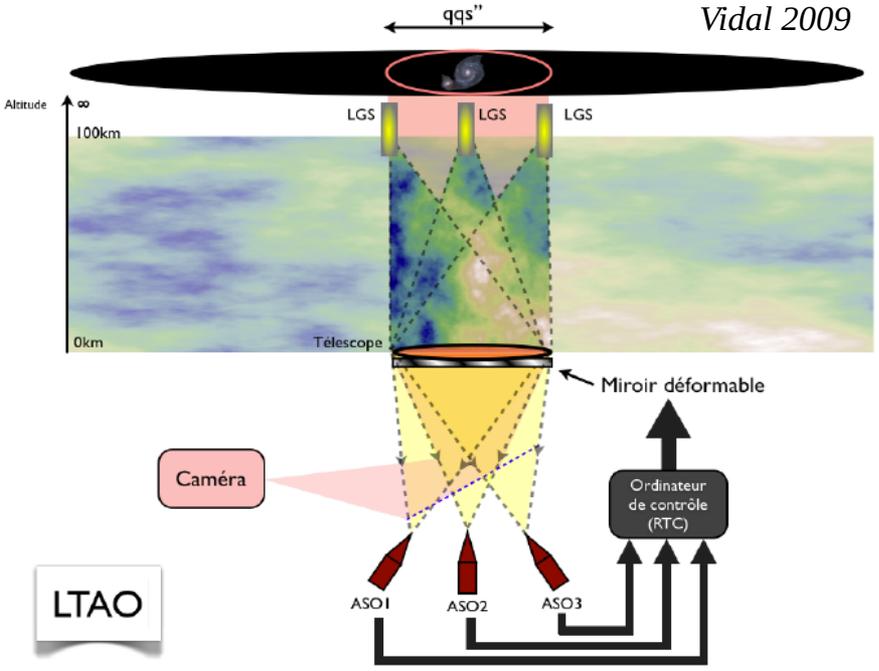


Gendron 2019

Travaux en cours pour optimiser l'analyse de surface d'onde avec une LGS

Laser Tomography Adaptive Optics (LTAO)

- Plusieurs LGS ou NGS chacune associée à un analyseur de surface d'onde
- Reconstruction 3D de la turbulence (tomographie)
→ déduction de la correction pour l'objet d'intérêt
- 1 seul miroir déformable



Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

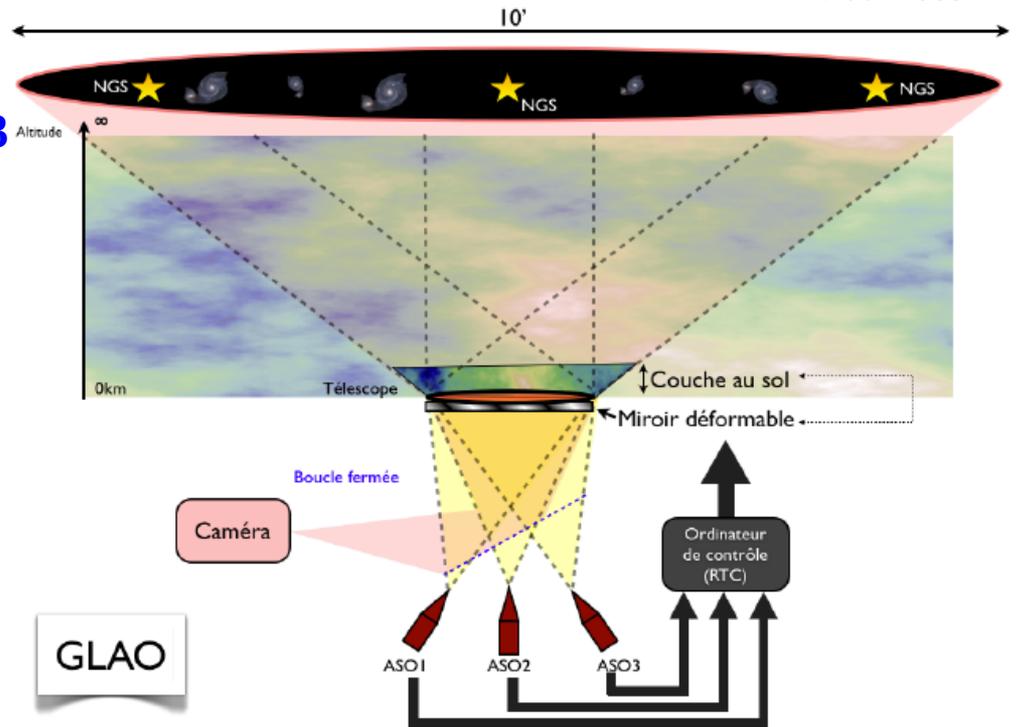
OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Ground layer adaptive optics (GLAO)

- Plusieurs LGS ou NGS chacune associée à un analyseur de surface d'onde
- Reconstruction 3D de la turbulence (tomographie)
 - correction de la couche proche du sol (*ground layer*)
- 1 seul miroir déformable

Vidal 2009



Amélioration du seeing d'un facteur 2-3



GLAO

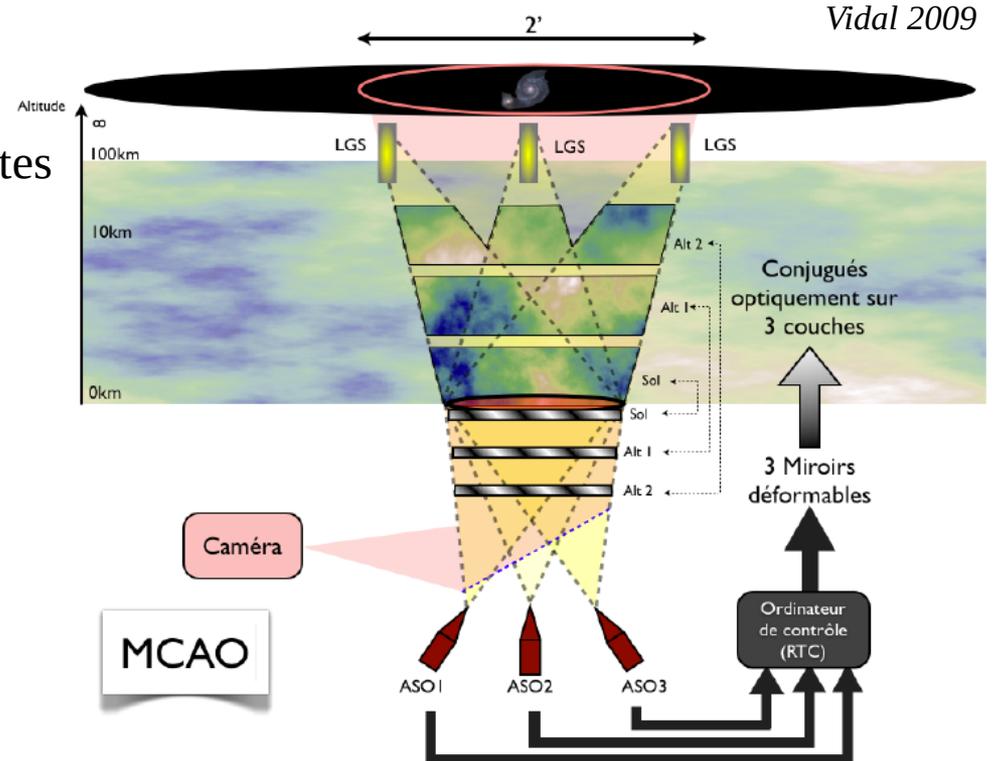
Multi-conjugated Adaptive Optics (MCAO)

- Plusieurs LGS ou NGS chacune associée à un analyseur de surface d'onde
- Reconstruction 3D de la turbulence (tomographie)
 - correction de la phase à plusieurs altitudes (plusieurs miroirs déformables)
- Typiquement 3 DM
 - 1 à 0m d'altitude
 - 2 aux 2 altitudes les plus turbulentes

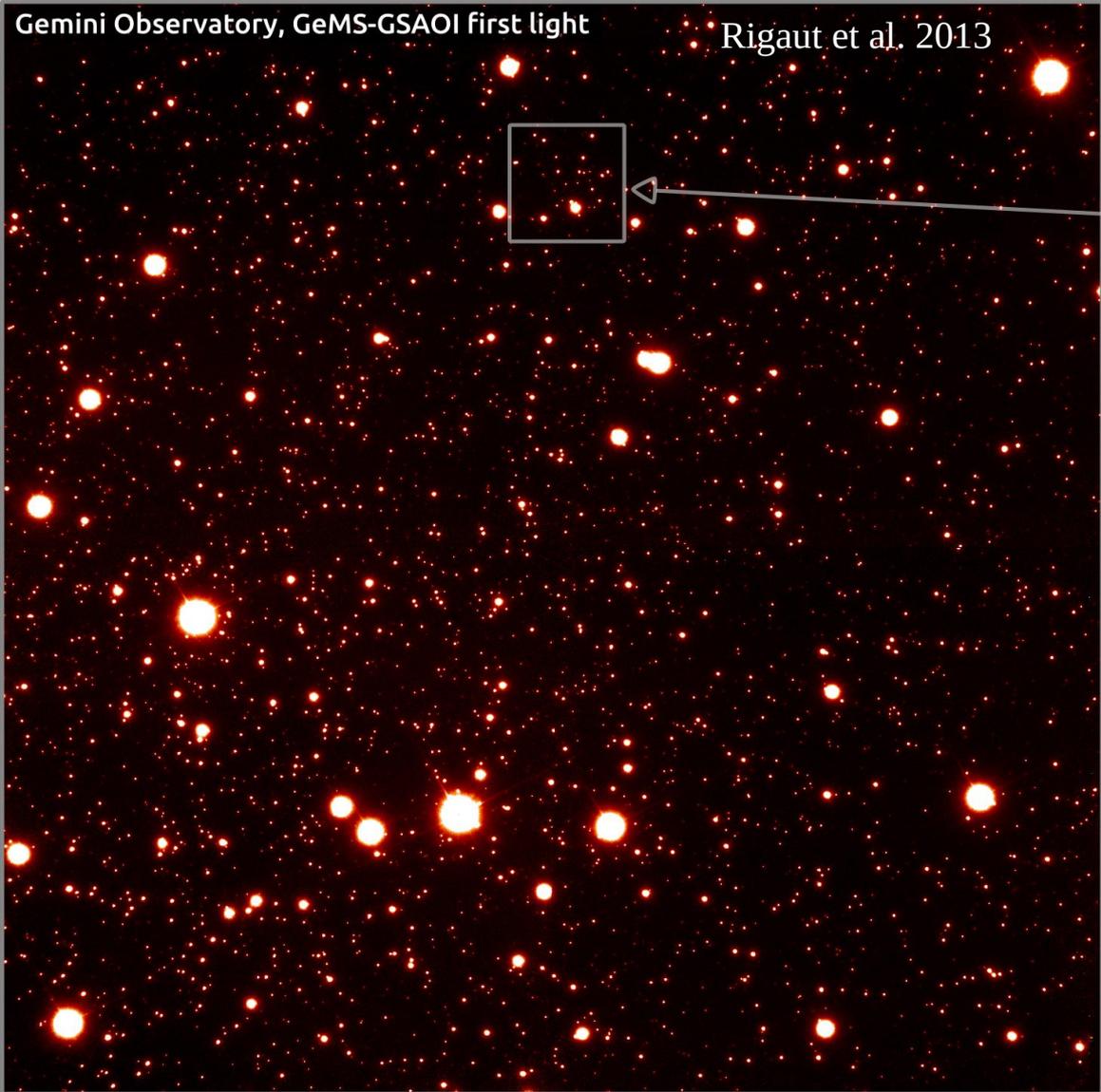
Même correction que SCAO dans tout le champ

Nb de DM et nb d'actionneurs & taille des optiques

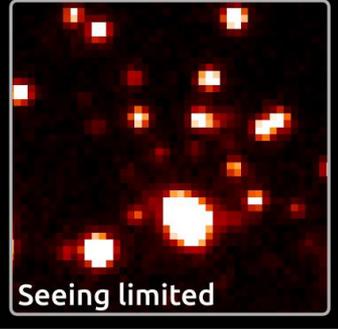
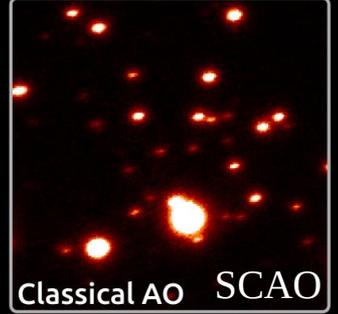
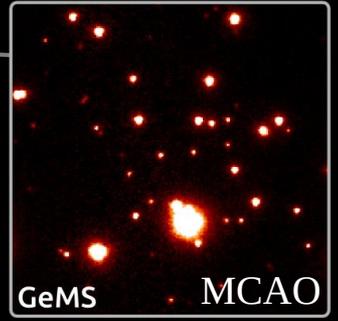
→ champ limité à quelques minutes



MCAO : un exemple



NGC288, H band
 13mn exposure
 Field of View 87"x87"
 FWHM = 0.080"
 FWHM rms = 0.002"

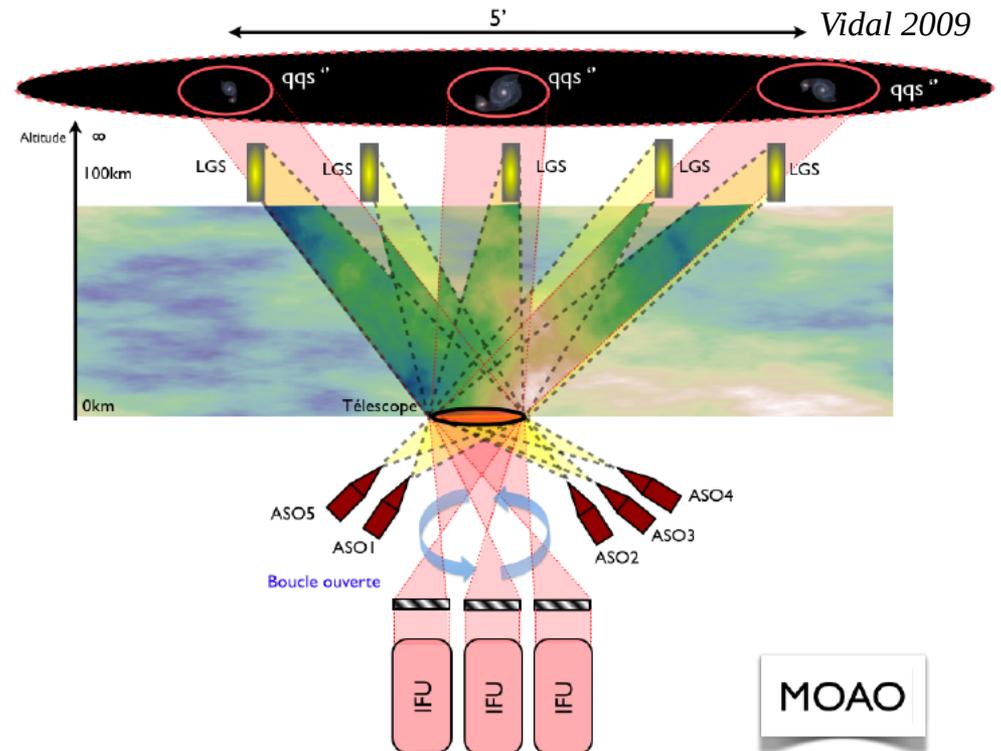


Multi-conjugated Adaptive Optics (MOAO)

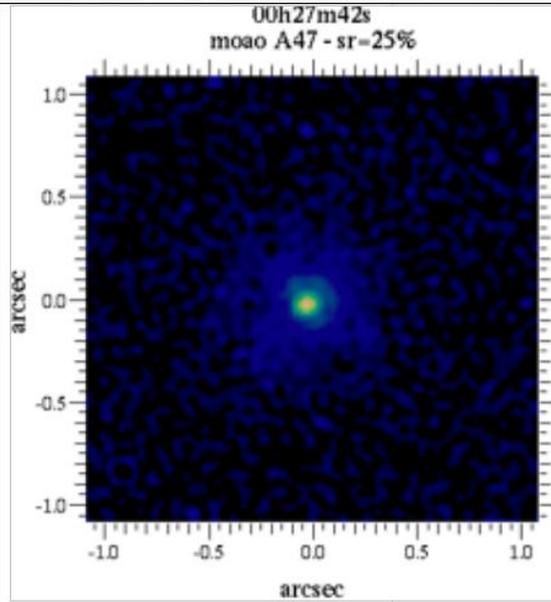
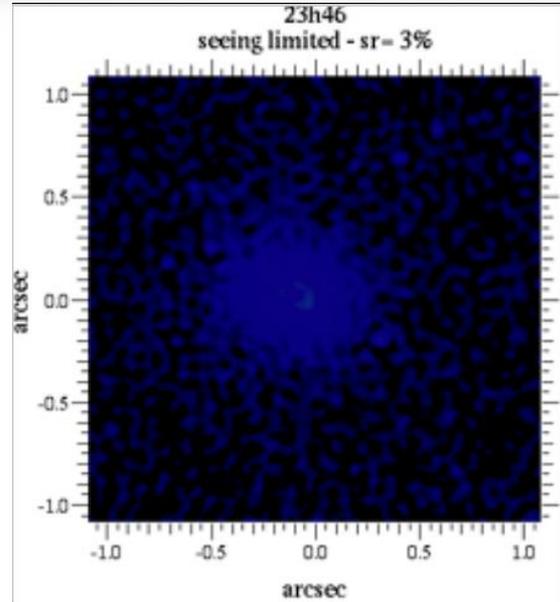
- Plusieurs LGS ou NGS chacune associée à un analyseur de surface d'onde
- Reconstruction 3D de la turbulence (tomographie)
 - correction de la phase dans quelques directions (plusieurs miroirs déformables)
- 1 DM par direction d'intérêt

Même correction que SCAO dans quelques directions d'intérêt

Contrôle des DM en boucle ouverte



MOAO : Canary et Raven

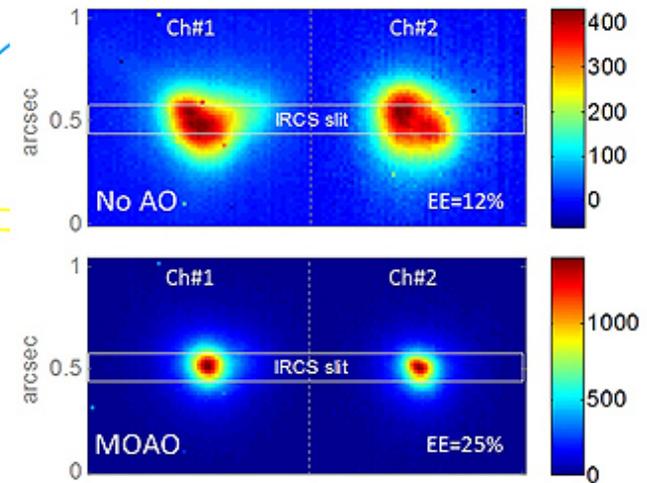
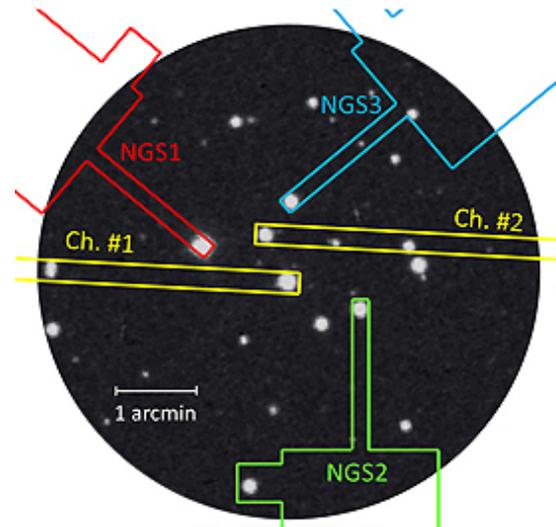


Canary @ 1,65 μ m

Gendron 2010

Raven / Subaru

Lardière 2014



Comparaison MCAO, GLAO, SCAO

Source étendue : le Soleil

Télescope : Goode Solar Telescope @ Big Bear Solar Observatory (USA)

https://est-east.eu/?option=com_content&view=article&id=1002&Itemid=622&lang=en

Schmidt, D. et al. 2016

Instrument Canary

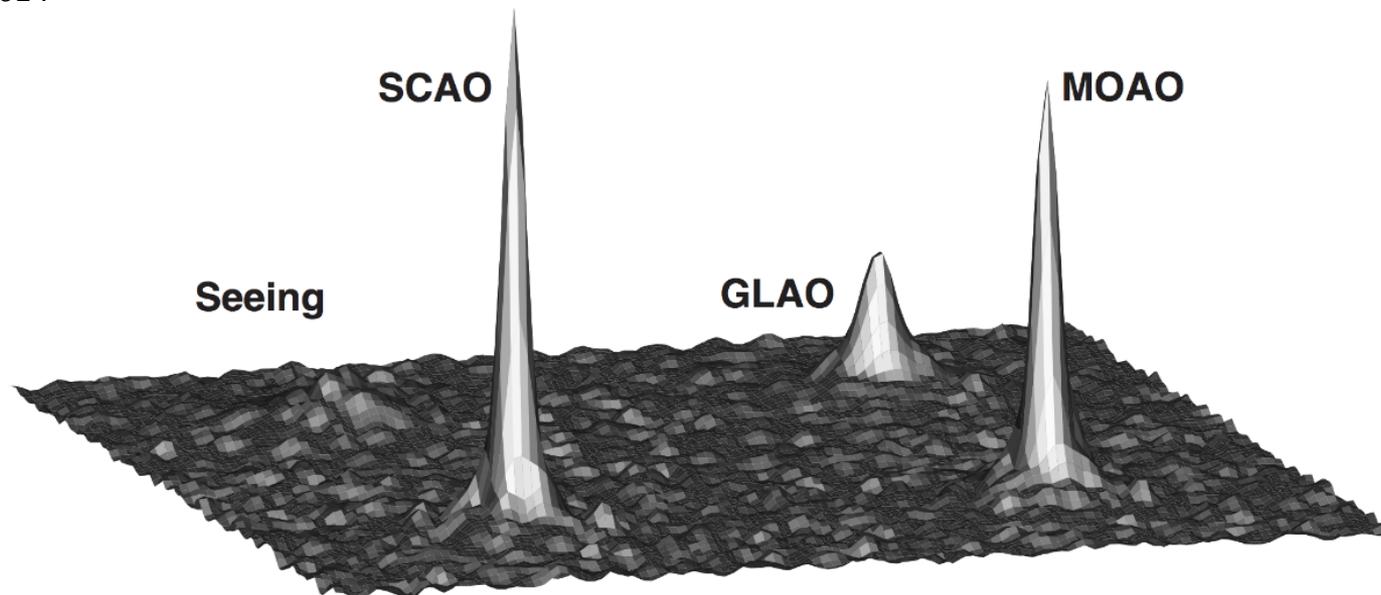
Vidal et al. 2014

Fig. 7. IR image comparison at $\lambda = 1\,530\text{ nm}$. The four images of 30 seconds exposure each were taken at $00^{\text{h}}59^{\text{m}}18^{\text{s}}$ (Seeing), $00^{\text{h}}42^{\text{m}}10^{\text{s}}$ (GLAO), $00^{\text{h}}29^{\text{m}}22^{\text{s}}$ (MOAO) and $00^{\text{h}}32^{\text{m}}28^{\text{s}}$ (SCAO). Measured SR are respectively: 1%, 9%, 19.4% and 23.8%.

Plan

Rappel : image dégradée par la turbulence

Principe de l'optique adaptative SCAO

Miroir déformable

Analyse de surface d'onde

Commande d'une boucle

Dimensionnement d'un système d'optique adaptative

L'exemple de NAOS et de SPHERE au VLT

Limites fondamentales de la SCAO

Étoile laser

OA multi-conjuguées : GLAO, MOAO, MCAO

Imagerie haute dynamique

Objectif : faire image d'objets ténus à côté d'objets très brillants

- **séparation** : fraction de seconde d'angle
- **rapport de luminosité** : $1e4$ à $1e10$

Exemples : exoplanètes, disques circumstellaires, étoiles (super-)géantes rouges, nébuleuses planétaires, étoiles AGB, étoiles binaires géante rouge-objet compact, compact starburst clusters, planètes, satellites et astéroïdes du système solaire, noyaux de galaxies

Principe : 1/ atténuer lumière de source ponctuelle sur axe optique
2/ transmettre lumière sources hors axe optique

Solution : coronographe stellaire

Besoin : **aberrations de phase et d'amplitude sub-nanométriques !**

Objectif : faire image d'objets ténus à côté d'objets très brillants

- **séparation** : fraction de seconde d'angle
- **rapport de luminosité** : $1e4$ à $1e10$

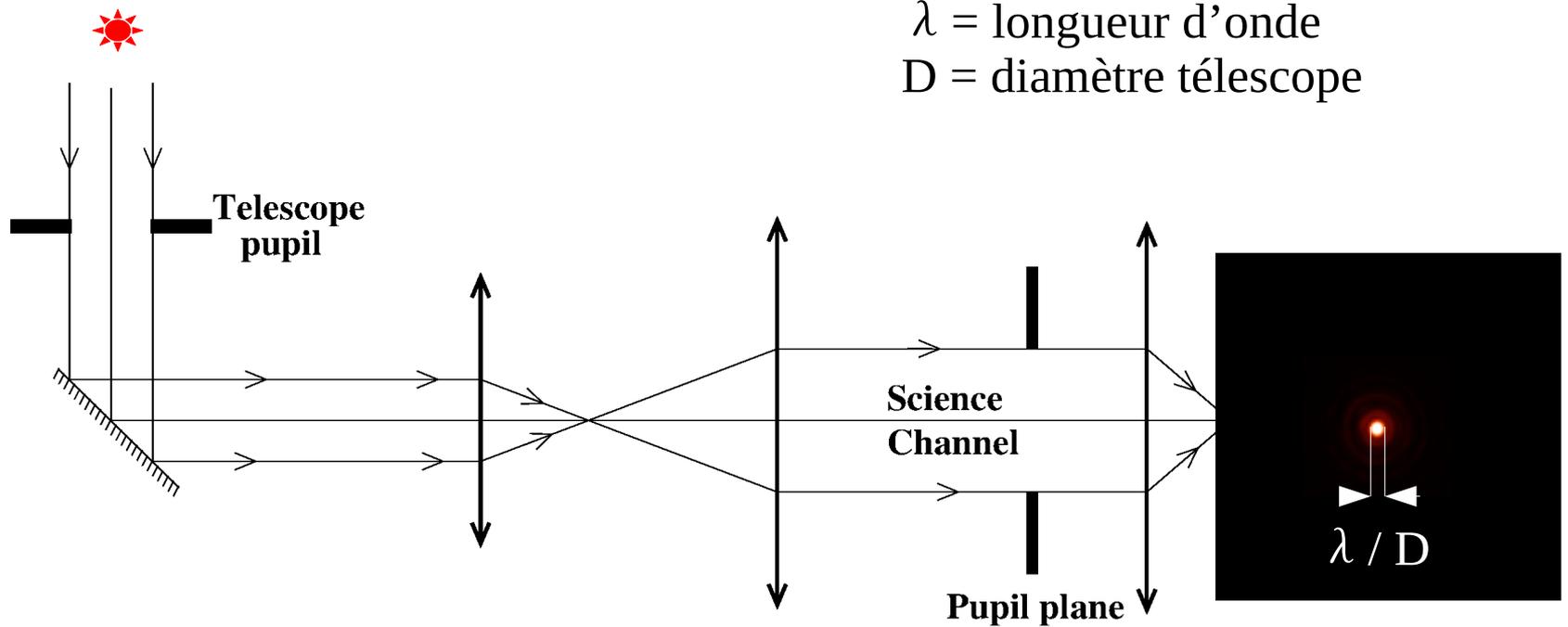
Exemples : **exoplanètes**, disques circumstellaires, étoiles (super-)géantes rouges, nébuleuses planétaires, étoiles AGB, étoiles binaires géante rouge-objet compact, compact starburst clusters, planètes, satellites et astéroïdes du système solaire, noyaux de galaxies

Principe : 1/ atténuer lumière de source ponctuelle sur axe optique
2/ transmettre lumière sources hors axe optique

Solution : coronographe stellaire

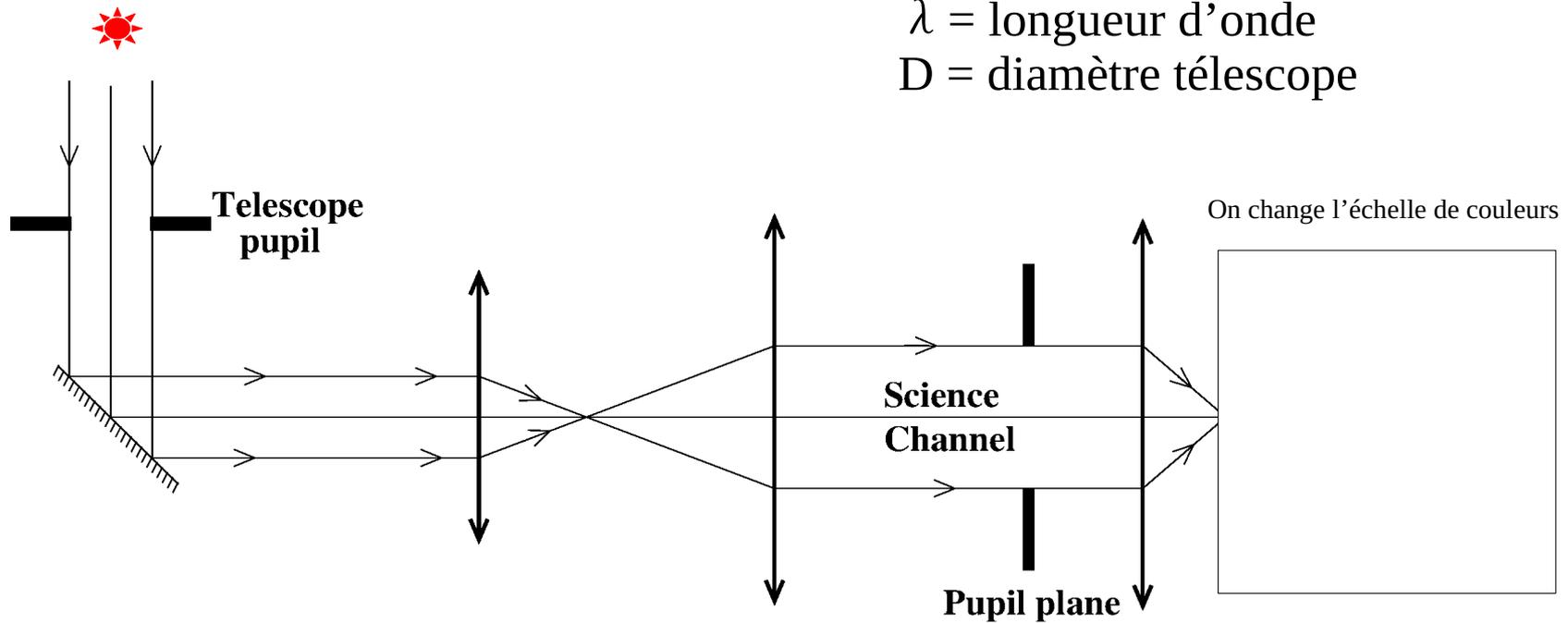
Besoin : **aberrations de phase et d'amplitude sub-nanométriques !**

Télescope + détecteur sans atmosphère 1/3



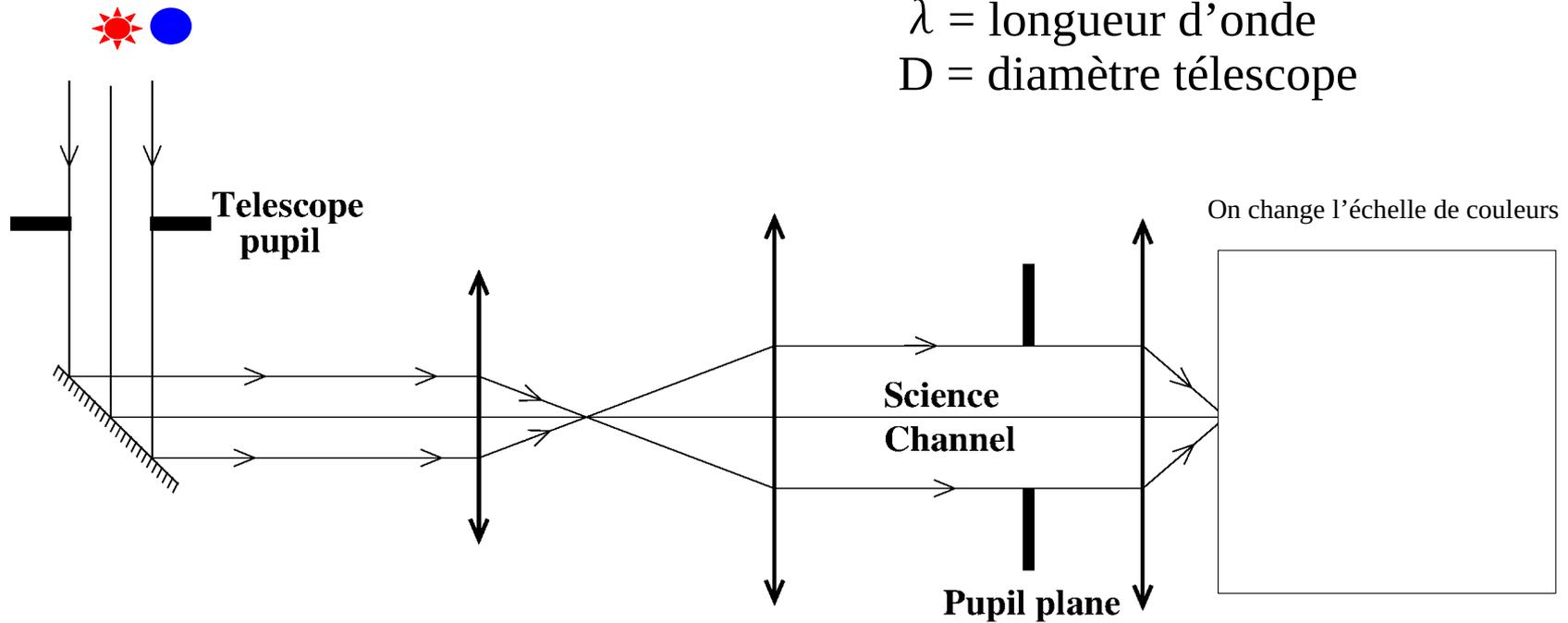
Tache de diffraction

Télescope + détecteur sans atmosphère 2/3



Tache de diffraction

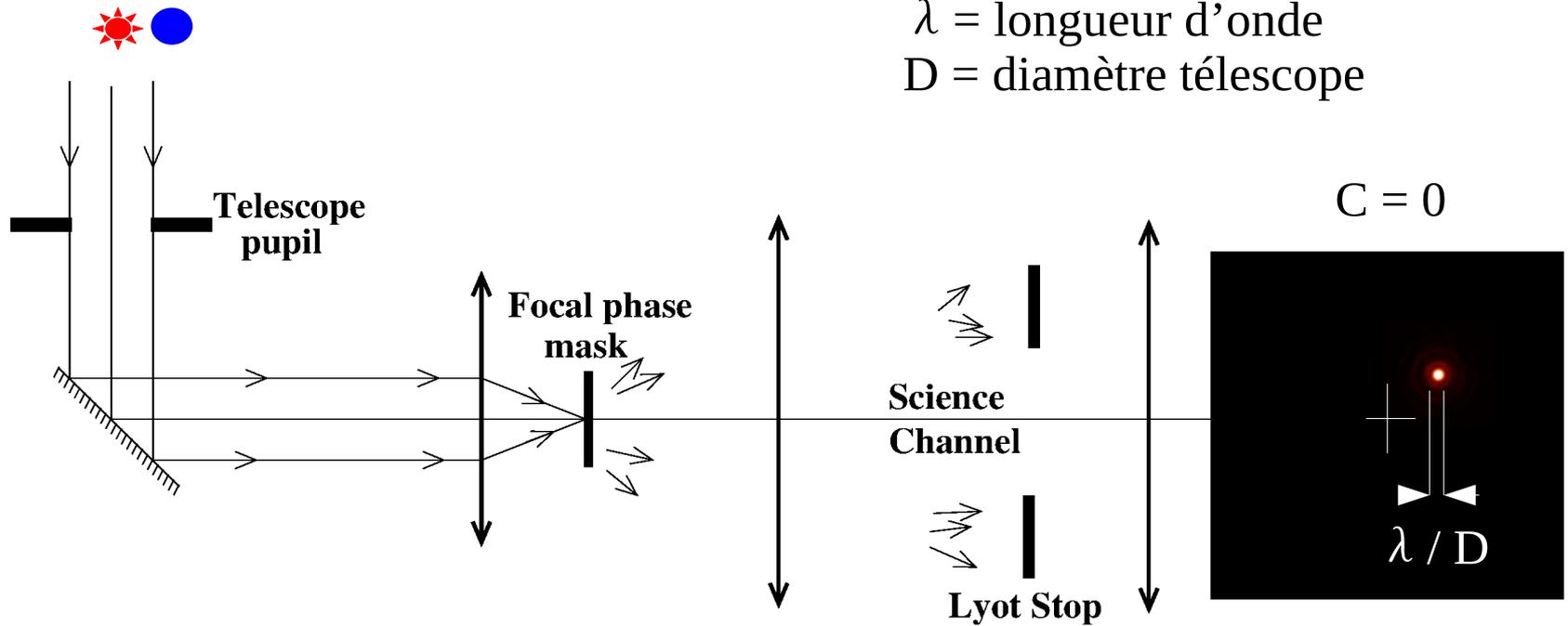
Télescope + détecteur sans atmosphère 3/3



Rapport de flux 10^4 to 10^{10}
 Séparation < 0.5 arcsec

\Rightarrow Seule l'étoile est détectée

Coronographe parfait sans atmosphère/aberrations



Coronographe = Filtre optique
 Lumière étoile non transmise
 Lumière planète transmise

Composants
 (apodiseur de pupille)
 masque plan focal
 diaphragme de Lyot

Besoin : surface d'onde plane = zéro aberrations de phase et d'amplitude !

Coronographe actuels si atmosphère/aberrations

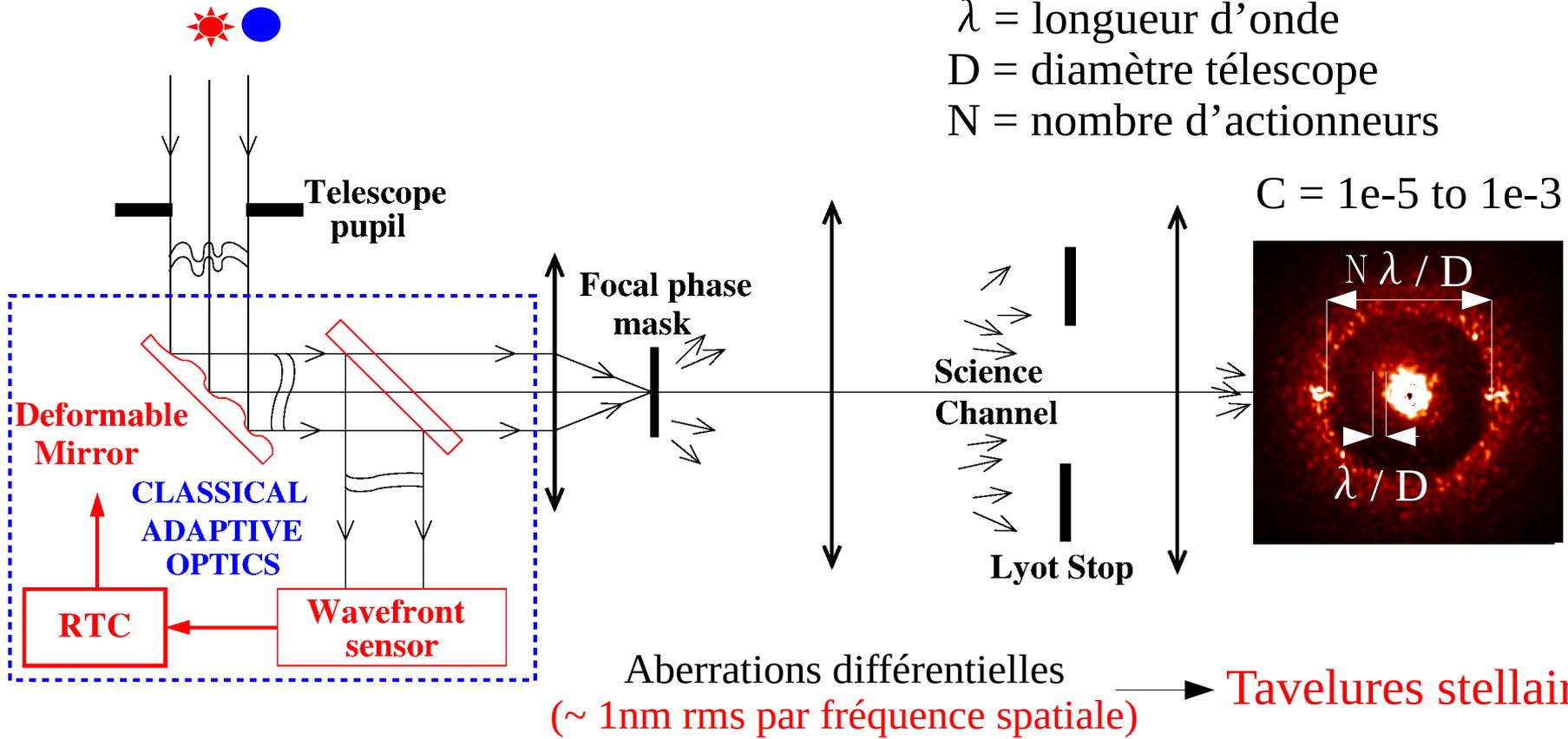
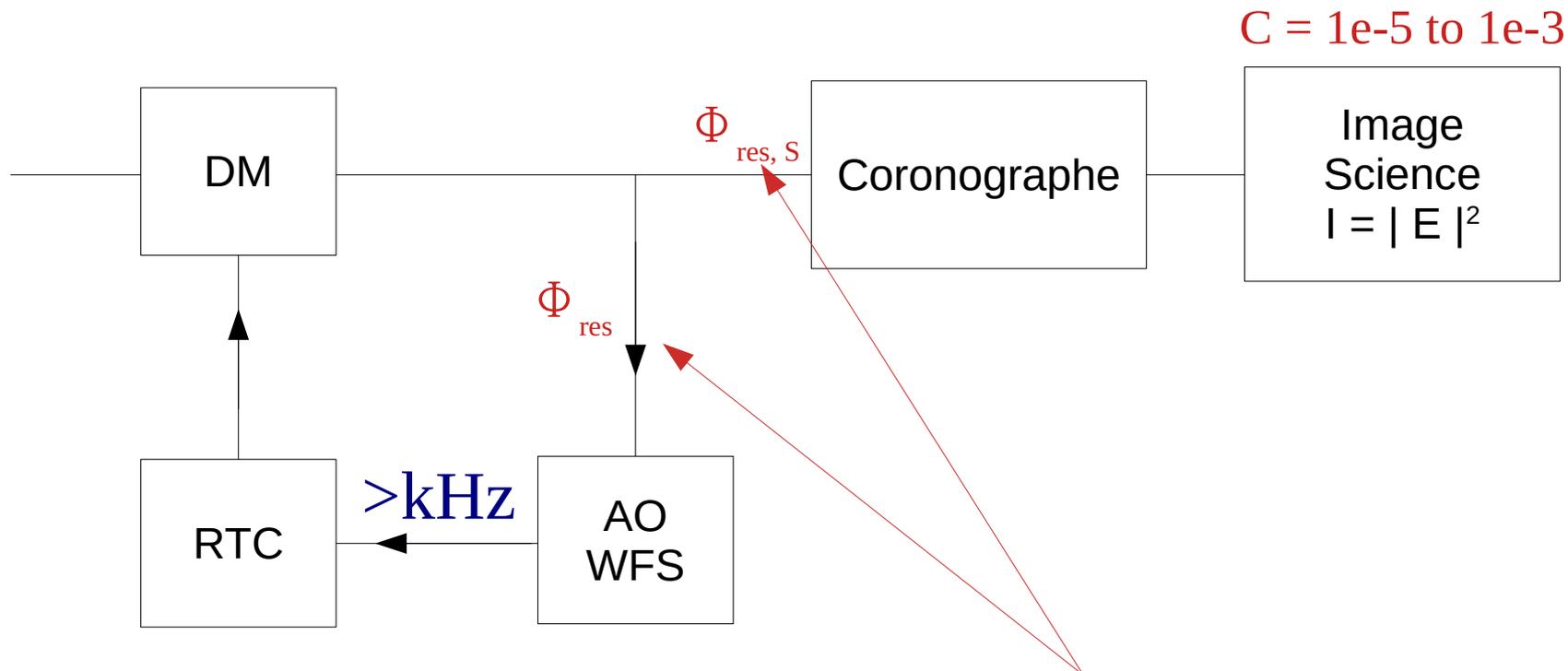


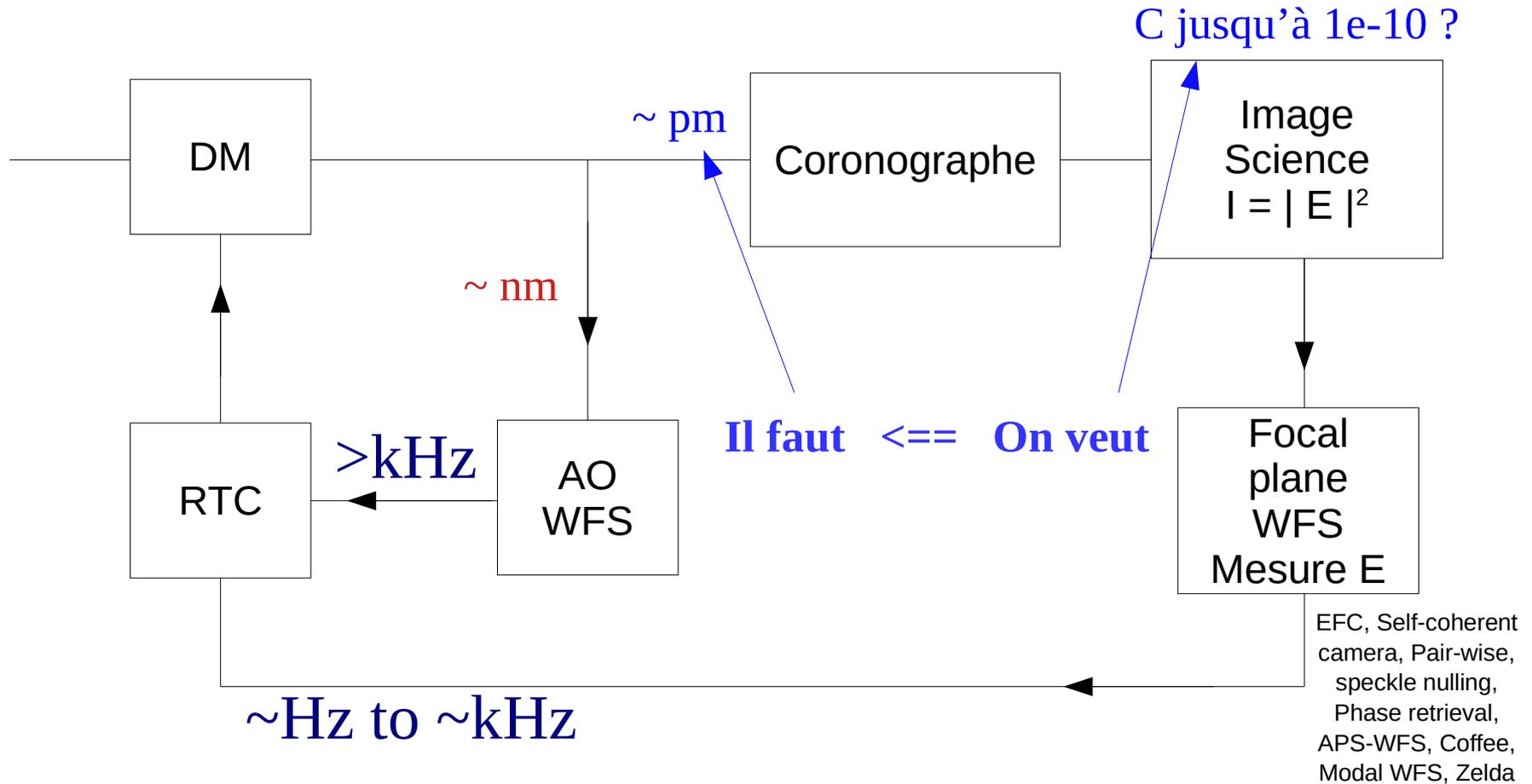
Schéma : instruments actuels



OA classique → aberrations différentielles > 1nm rms

$$\Phi_{\text{res, S}} \neq \Phi_{\text{res}}$$

Schéma : instruments futurs

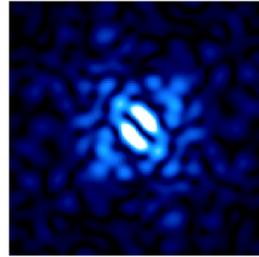


Besoin : mesurer la surface d'onde dans image Science

= mesurer amplitude complexe E à partir de son module au carré $I=|E|^2$

Analyse de surface d'onde en plan focal

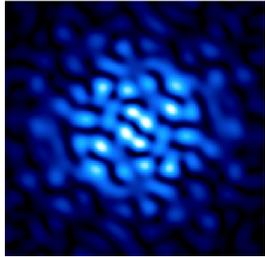
Aberrations => tavelures (=speckles)



$$I = |E|^2$$

- Modulation temporelle de l'intensité des tavelures**

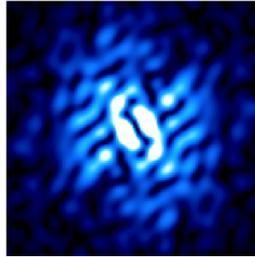
Exemple de techniques : Pair-wise, speckle nulling, phase retrieval, Coffee



Cherché

$$I = |E + E_1|^2$$

Connu



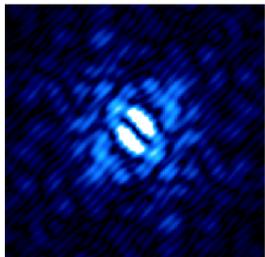
Cherché

$$I = |E + E_2|^2$$

Connu

- Modulation spatiale de l'intensité des tavelures**

Exemple de techniques : Self-coherence camera, Modal WFS



Connu

$$I = |E|^2 + |E_R|^2 + 2E E_R^* \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right)$$

Cherché

Correction pour l'imagerie très haute dynamique

Optique adaptative

→ minimisation de la phase

Imagerie très haute dynamique

→ minimisation de l'intensité stellaire dans image science

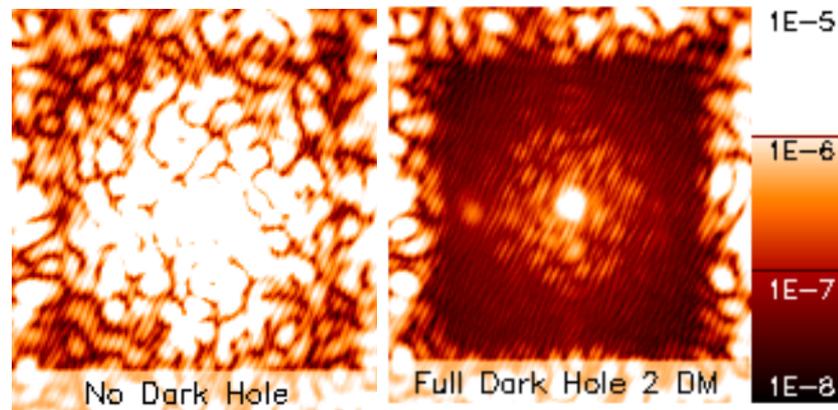
Permet de :

- Compenser les effets de phase
- Compenser les effets d'amplitude
- Choisir la zone d'intérêt

Compenser phase et amplitude dans tout champ

→ au moins 2 DM

Avant fermeture de la boucle Après fermeture de la boucle



SCAO et OA multi-conjuguées

Nom	étoile(s) guide(s)	Nombre de WFS	Nombre de DM	Particularités	Champ d'observation
SCAO	NGS	1	1	Faible couverture	~10''
LTAO	LGS + 1 NGS (tip-tilt)	1 par étoile guide	1	~100 % du ciel	~10''
GLAO	LGS / NGS	1 par étoile guide	1 conjugué avec couche du sol	Correction moyenne sur tout le champ	5-10'
MCAO	LGS / NGS	1 par étoile guide	Multiple (>1)	Bonne correction sur tout le champ	~2'
MOAO	LGS / NGS	1 par étoile guide	1 par étoile guide	Bonne correction dans N directions	N x 10'' N= nb étoiles guides
ITHD	NGS	(1 classique) + 1 focal plane	1 ou plusieurs	Correction atmosphère + aberrations optiques	~10''

Fin du cours 1