

ONERA



Introduction à l'Optique Adaptative

Gérard ROUSSET

Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA)

Département d'Optique Théorique et Appliquée

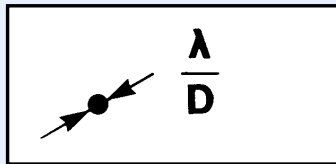
PLAN DE L'EXPOSE

- ❑ **Front d'onde turbulent**
- ❑ **Principe de l'optique adaptative**
- ❑ **Miroir déformable**
- ❑ **Analyse de front d'onde**
- ❑ **Commande spatiale et temporelle**
- ❑ **Limitations fondamentales**
- ❑ **Optique adaptative multiconjuguée**
- ❑ **Dimensionnement d'une optique adaptative**

Formation des images

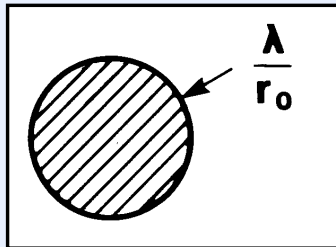
- ❑ **Image formée par le télescope : $i(\alpha) = o(\alpha) \star h(\alpha)$**
 Convolution de l'objet $o(\alpha)$ par la réponse impulsionnelle $h(\alpha)$
 $h(\alpha)$ généralement “mal connue” à travers la turbulence
- ❑ **Dans l'espace des fréquences spatiales : $\tilde{i}(f) = \tilde{o}(f) \cdot \tilde{h}(f)$**
 $\tilde{h}(f)$: fonction de transfert optique incluant télescope et atmosphère
- ❑ **Fonction de transfert instantanée : $\tilde{h}(f) = \text{autocor}(P(\mathbf{r})\exp(i\varphi(\mathbf{r})))$**
 $P(\mathbf{r})$: support de la pupille
 $\varphi(\mathbf{r})$: phase du front d'onde dans la pupille (turbulence et aberrations)
 $\exp(i\varphi(\mathbf{r}))$: champ dans la pupille dans l'approximation de champ proche (scintillation négligeable)

Effet de la turbulence sur la formation des images



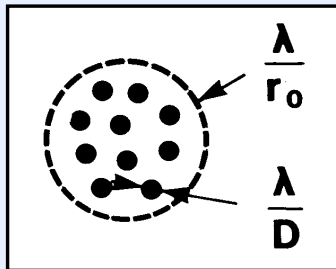
Sans turbulence

D : diamètre de l'instrument

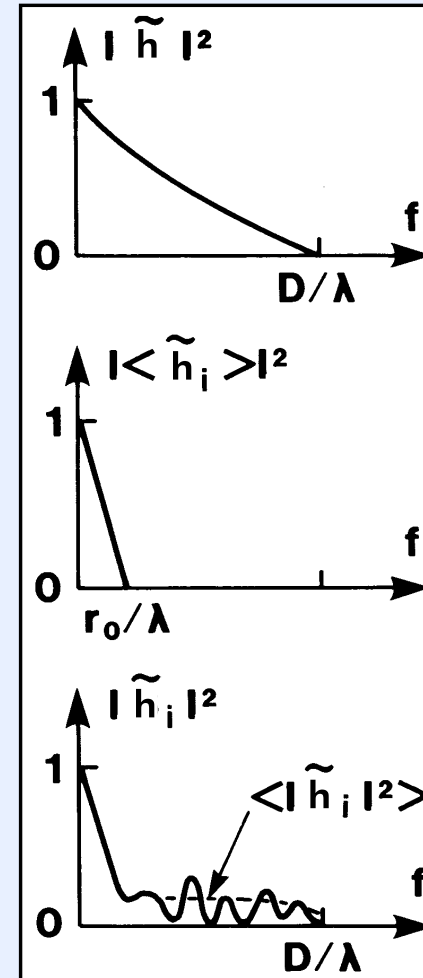


Pose longue avec turbulence

r_0 : diamètre de cohérence (Fried)



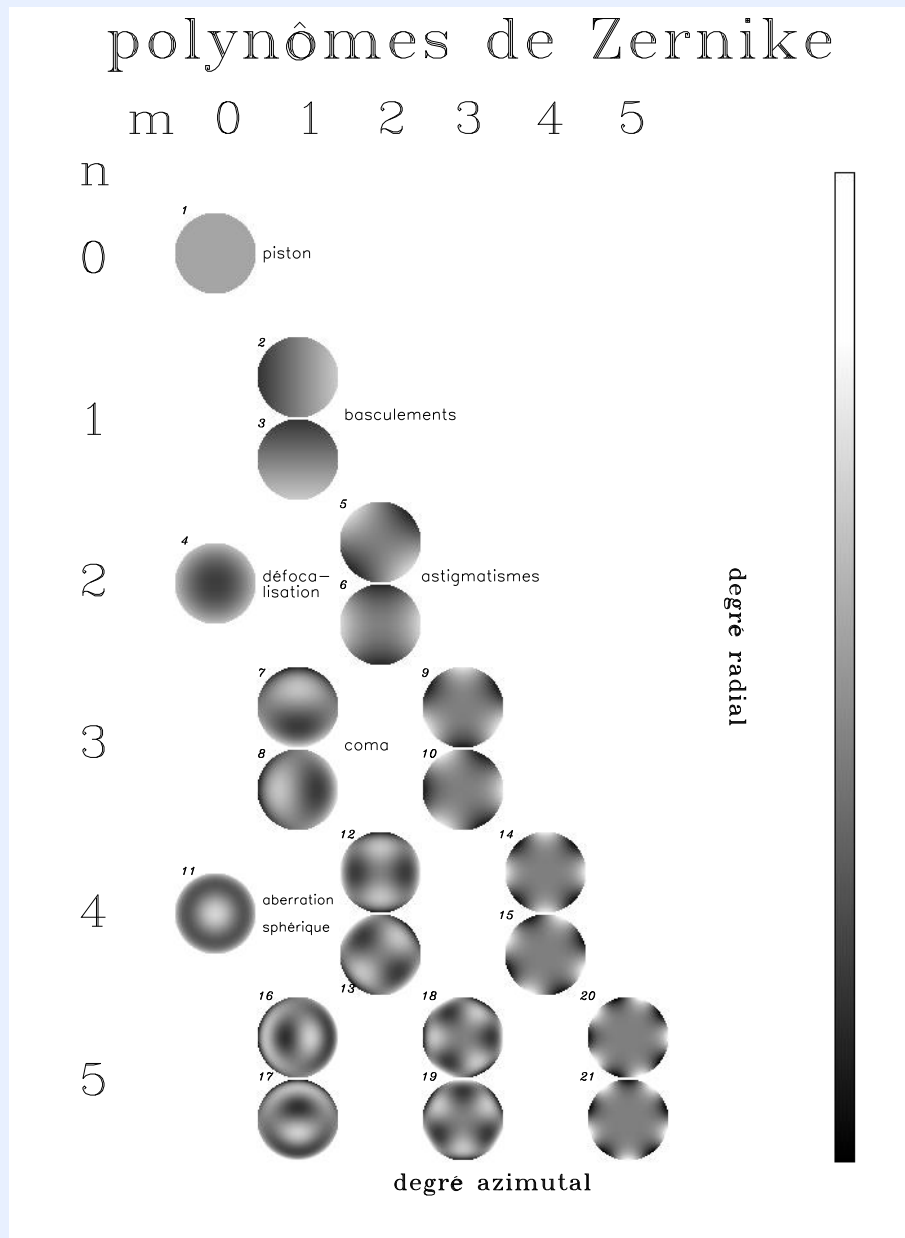
Pose courte avec turbulence



ONERA

Décomposition de la phase

Sur une base de modes : $\varphi(\vec{r}) = \sum_i \varphi_i Z_i(\vec{r})$

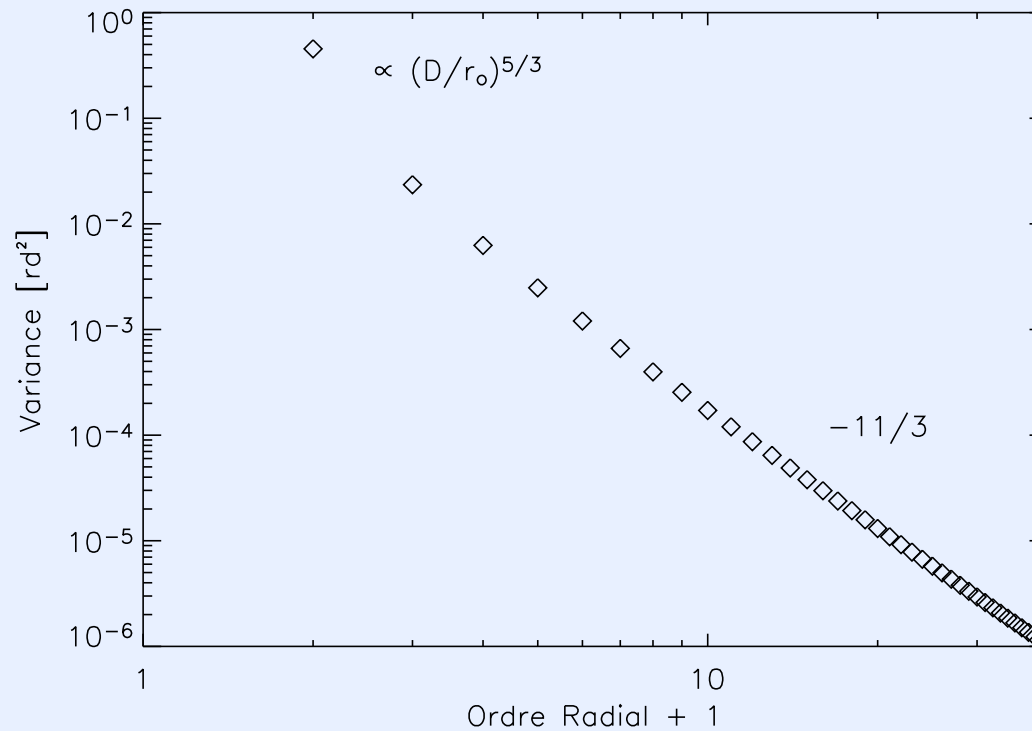


Ordre radial $n \nearrow \Rightarrow$ Fréquence spatiale \nearrow

Caractérisation statistique de la phase turbulente

❑ Spectre de Kolmogorov \Rightarrow matrice de covariance C_φ .

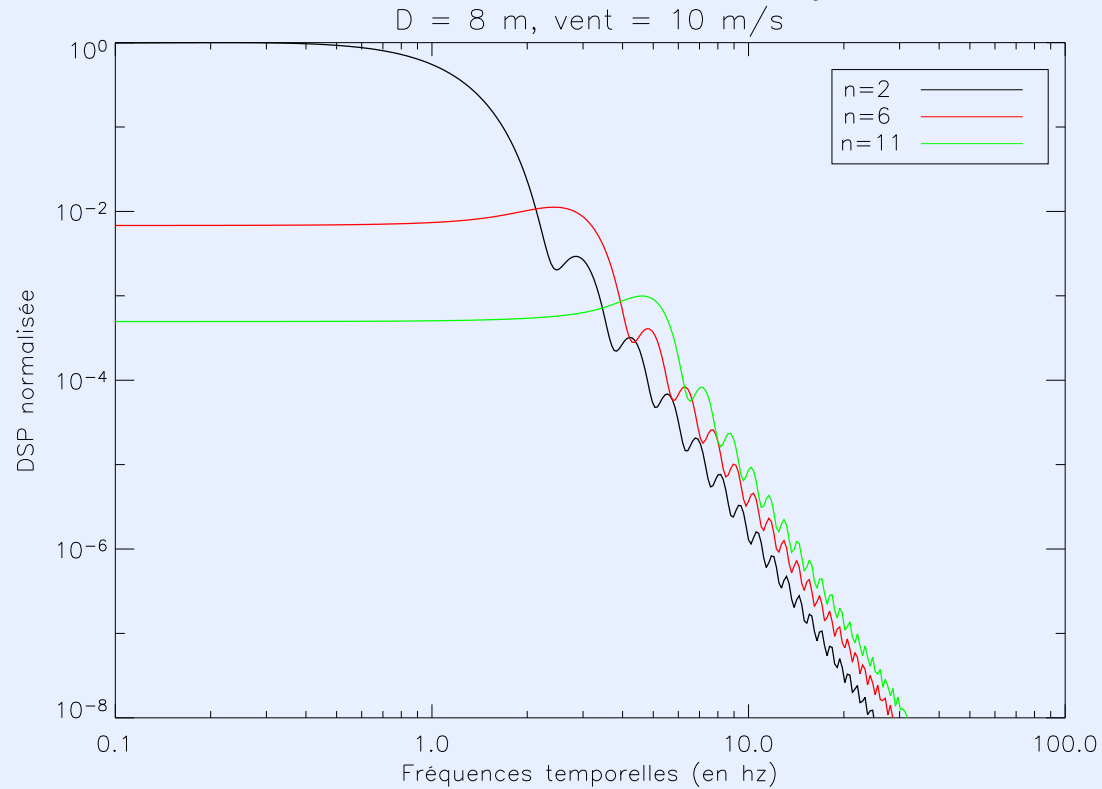
❑ $C_\varphi(j, j) = \sigma_{\varphi_j}^2$, dans la base des polynômes de Zernike :



$$\sigma_{\varphi_j}^2 \propto (n + 1)^{-11/3} (D/r_o)^{5/3}$$

Spectres temporelles de la phase turbulente

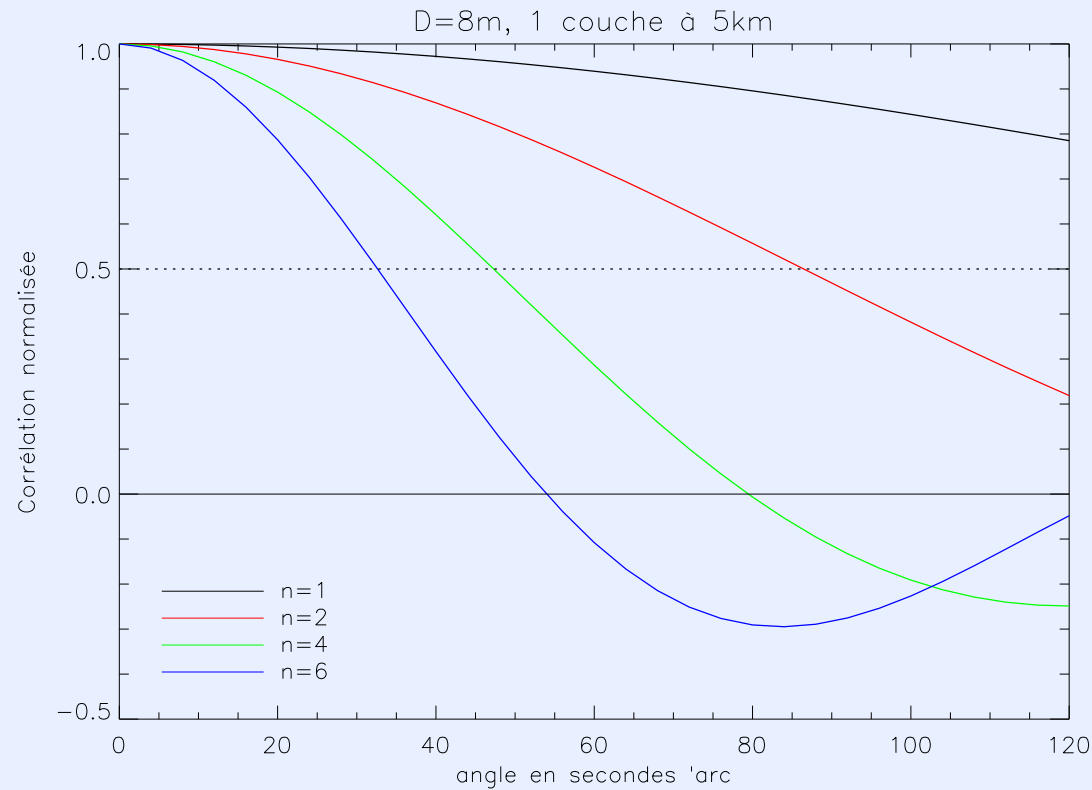
□ Densité spectrale des coefficients de Zernike (φ_j)



□ Fréquence de coupure : $f_c = 0.3(n + 1)V/D$

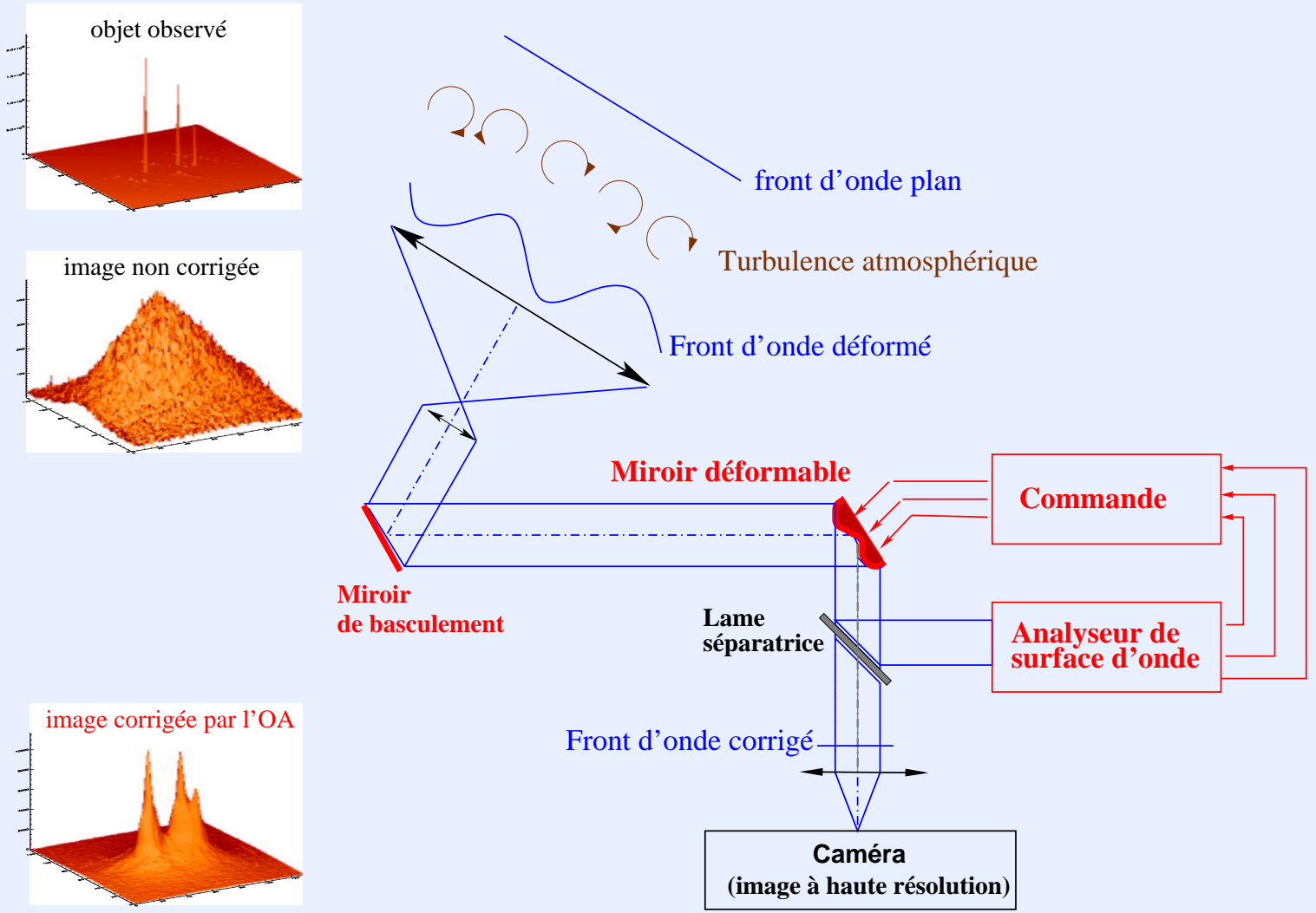
Décorrélations angulaires de la phase turbulente

□ Coefficients de corrélation angulaire des coefficients de Zernike (φ_j)



□ Angle à 50% de corrélation $\propto D/(n + 1)$

Principe de l'optique adaptative



G. Roussel - Oct 2003



PARAMETRES D'UNE OPTIQUE ADAPTATIVE

Télescope de $8m$

Turbulence : $r_o(0,5\mu m) = 10cm; V \sim 10m/s$

SR	bon Strehl		haut Strehl	
Echantillonnage spatial	$d \simeq r_0$		$d < r_0$	
Longueur d'onde	$0,5\mu m$	$2,2\mu m$	$0,5\mu m$	$2,2\mu m$
Nombre d'actionneurs				
$\propto (D/d)^2$	6400	200	64000	2000
Echantillonnage temporel				
$\propto 10V/r_o$ (kHz)	1	0.2	5	1

Attention !!! Magnitude limite \searrow si $d \searrow$

ONERA

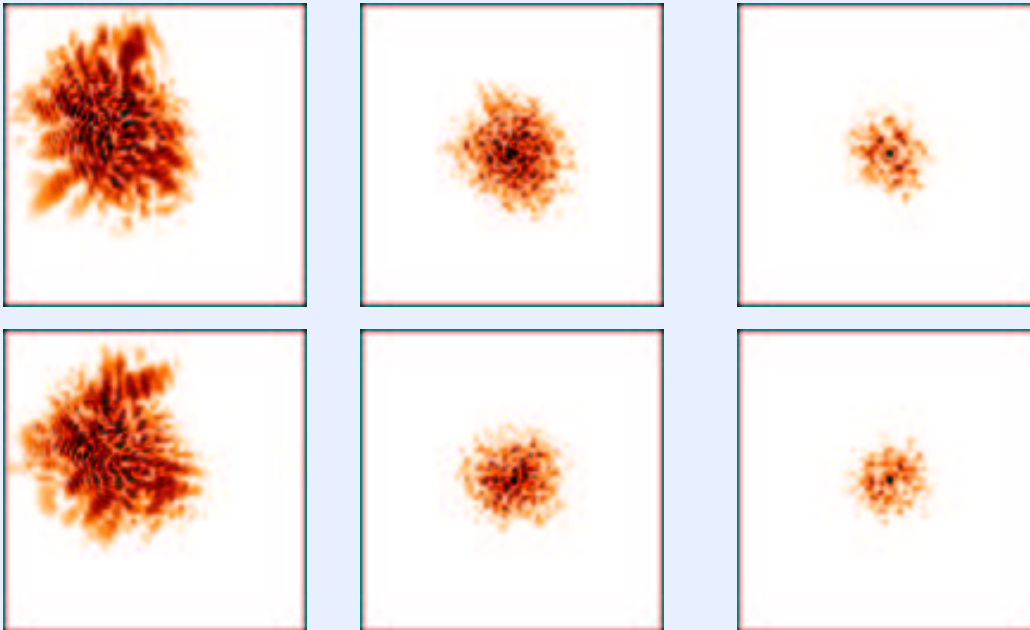


Images en correction partielle

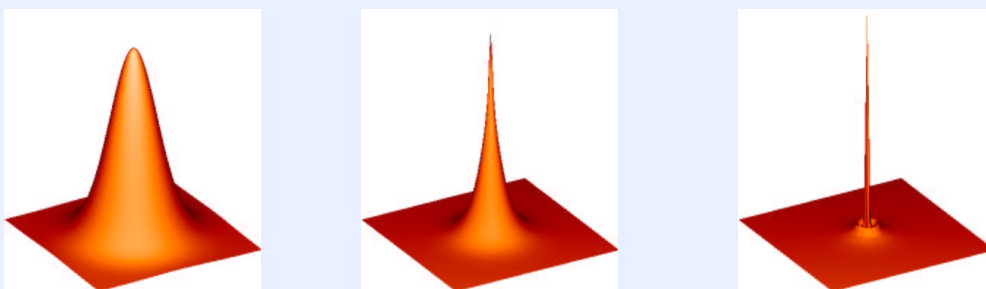
$$\lambda = 0.7\mu m; D/r_o = 20; V/r_o = 200Hz$$

sans correction faible correction correction partielle

images courte pose [échelle log]



images longue pose (normalisées)



Réduction du nombre de speckle

Concentration des photons dans le coeur cohérent

Exemple d'image corrigée par NAOS

Surface de la Lune, champ 26 arcsec (45km), $\lambda = 2.3\mu m$

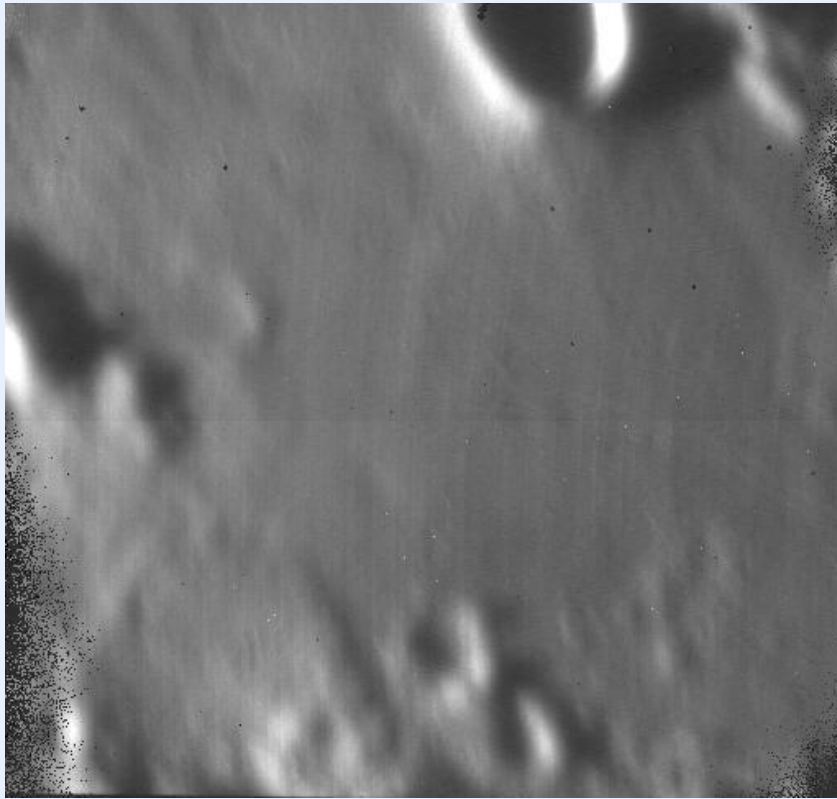


Image brouillée par la turbulence



Image corrigée par l'optique adaptative

G. Rousset – Oct 2003



Réponse impulsionnelle longue pose en optique adaptative

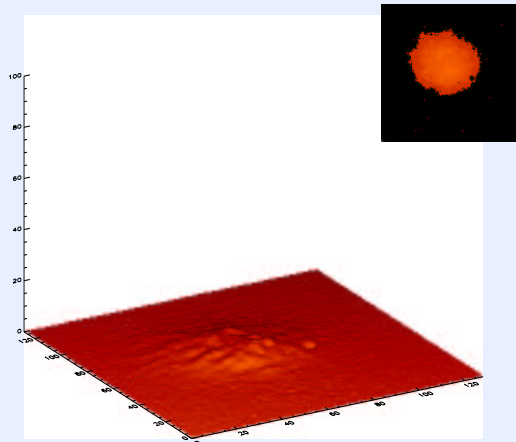


image turbulente

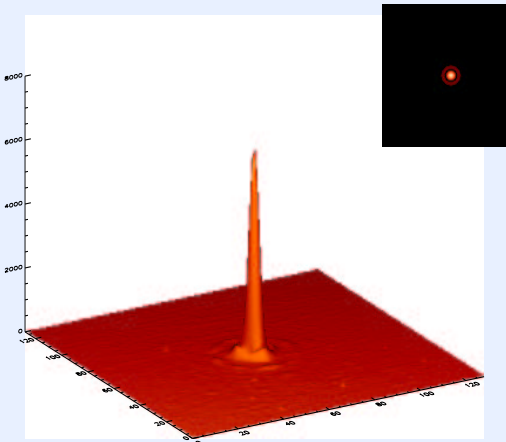
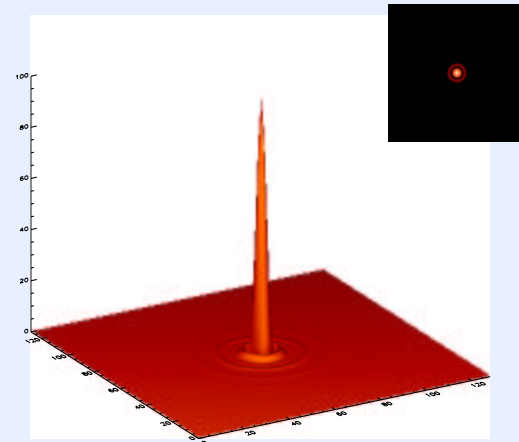


image corrigée ($SR = 64\%$)

Longueur d'onde d'imagerie : $2.2\mu m$

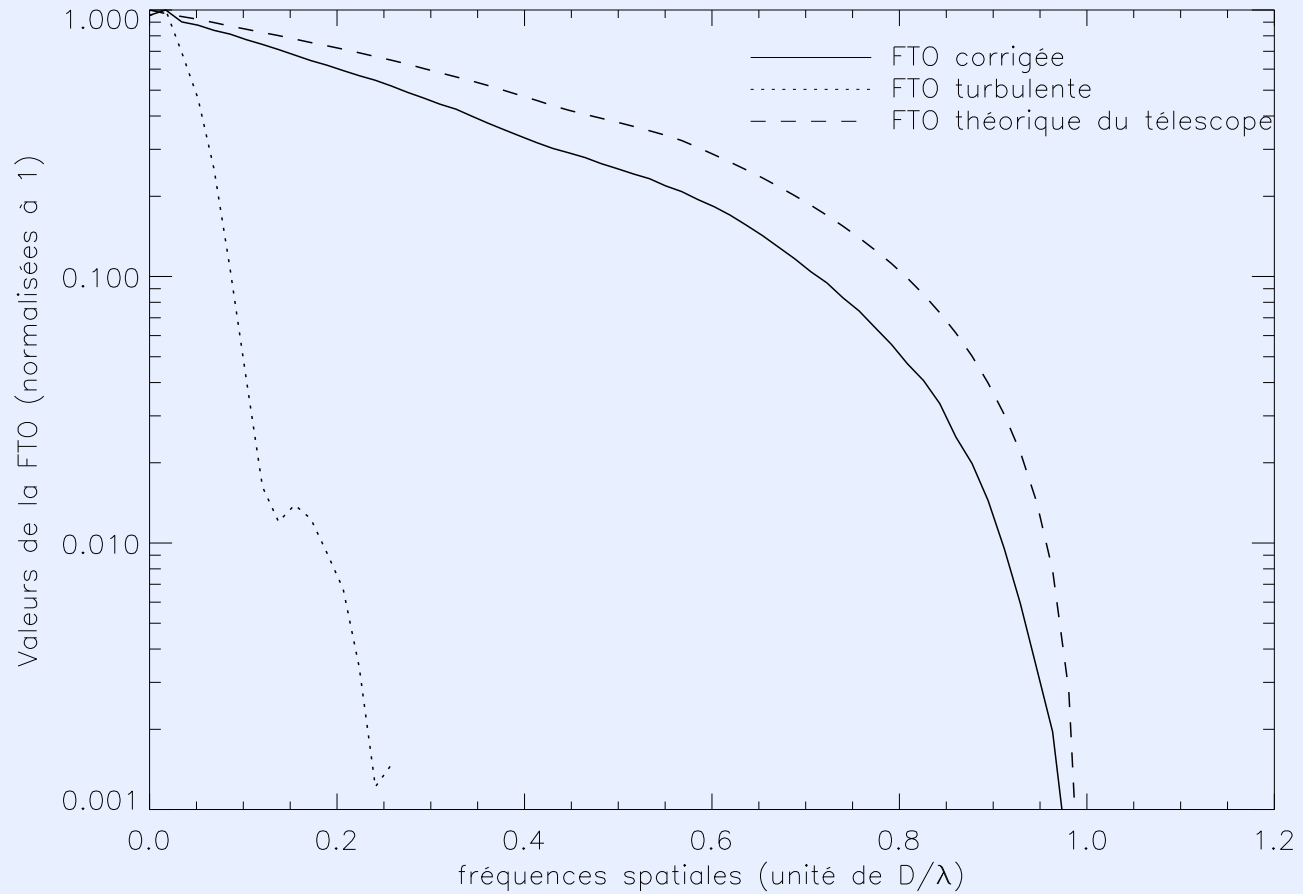


tâche d'Airy

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

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

Fonction de transfert en optique adaptative



G. Rousset – Oct 2003

Information spatiale restituée jusqu'à D/λ



MIROIRS DEFORMABLES

❑ Technologies classiques : actionneur piézoélectrique

➡ Stacked-Array : grand nombre et grande bande passante

➡ bimorphe : faible nombre et faible bande passante

❑ Nouveaux développements :

➡ secondaires adaptatifs : MMT 336 actionneurs

voice coil, miroir coque mince

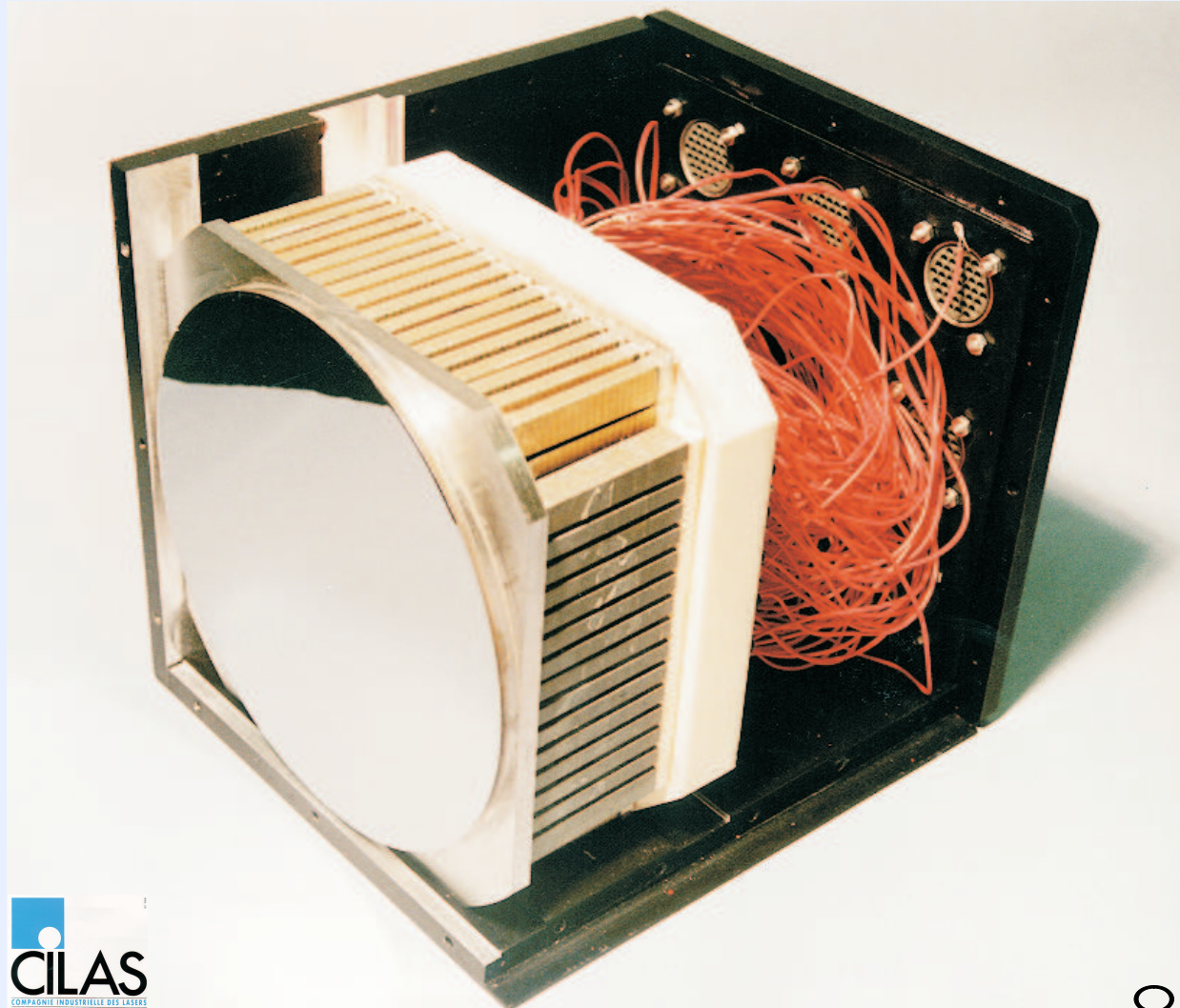
➡ micro-miroirs : développements au LAOG et au LAM

actionneur électrostatique (magnétique), membrane

➡ cristaux liquides (faible bande passante, bande spectrale étroite)

Miroir déformable de type SAM

Actionneurs piézoélectriques discrets à empilement

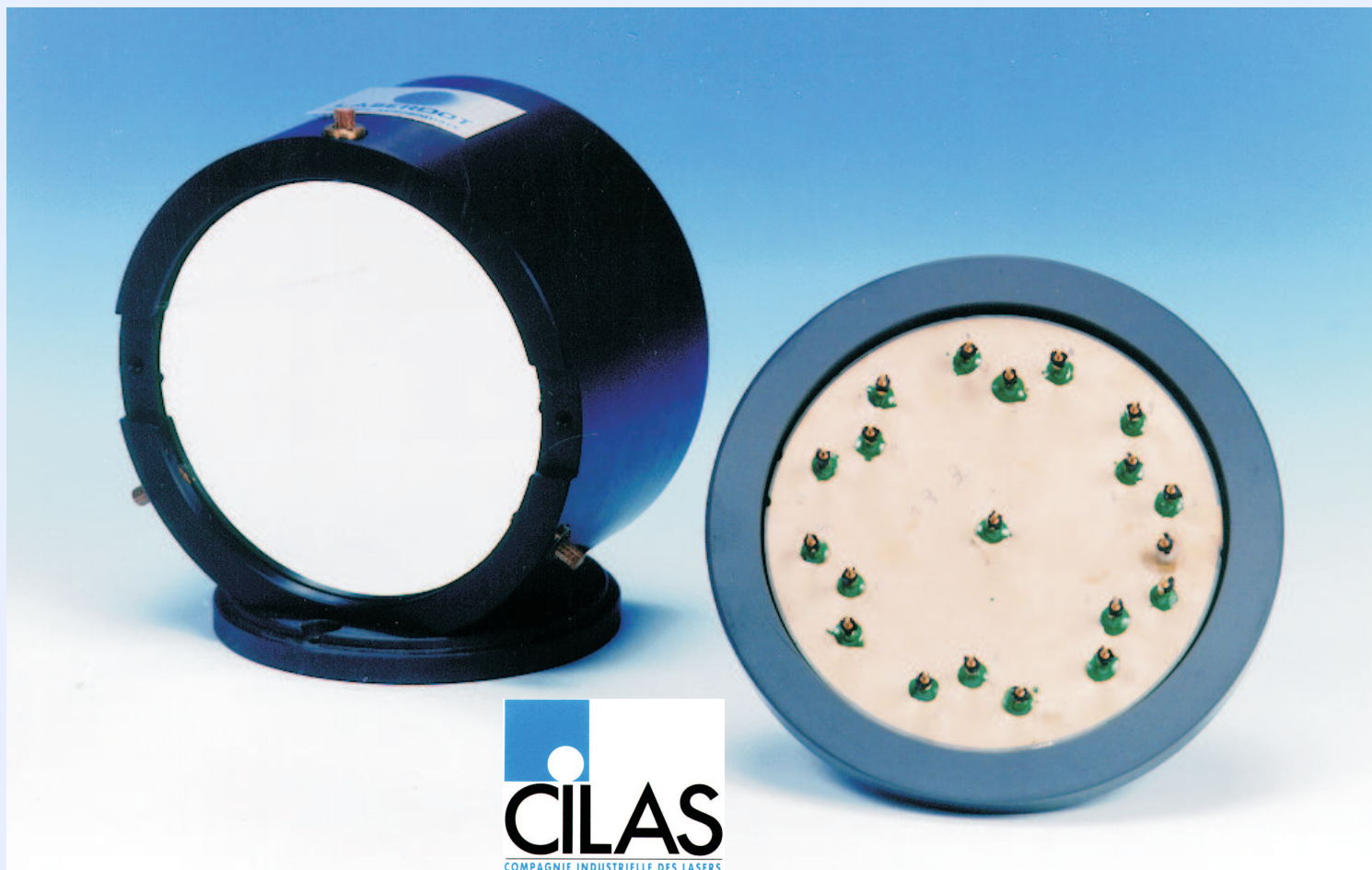


G. Rousset – Oct 2003



Miroir déformable de type bimorphe

Electrodes entre deux plaques piézoélectriques



G. Rousset – Oct 2003



COMMENT ANALYSER LE FRONT D'ONDE ?

En optique : coder la phase en variations d'intensité

❑ Techniques "plan focal"

(réponse impulsionnelle liée au front d'onde)

☞ Phase retrieval

☞ Diversité de phase, modulation

❑ Techniques "plan pupille"

☞ Optique géométrique

(rayons lumineux orthogonaux au front d'onde)

✓ Shack-Hartmann, pyramide (pente)

✓ Roddier (courbure)

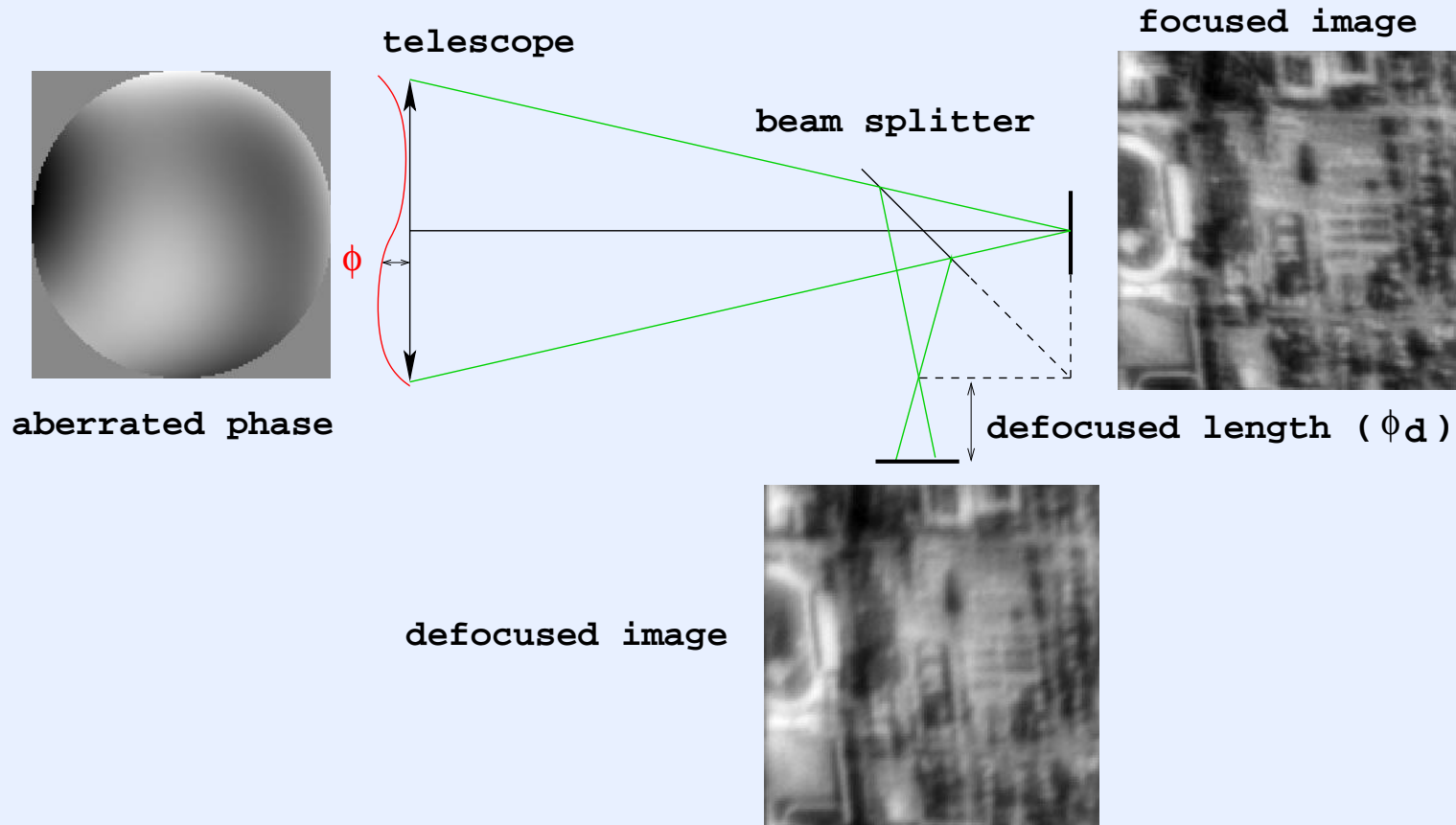
☞ Interférométrie

(différences de phase codées en franges d'interférence)

✓ Interféromètre à décalage

✓ Mach-Zender / Smartt

PRINCIPE DE LA DIVERSITE DE PHASE



Relations liant les deux plans :

$$\varphi_1 = \varphi \text{ et } \varphi_2 = \varphi + \varphi_{\text{défoc}}$$

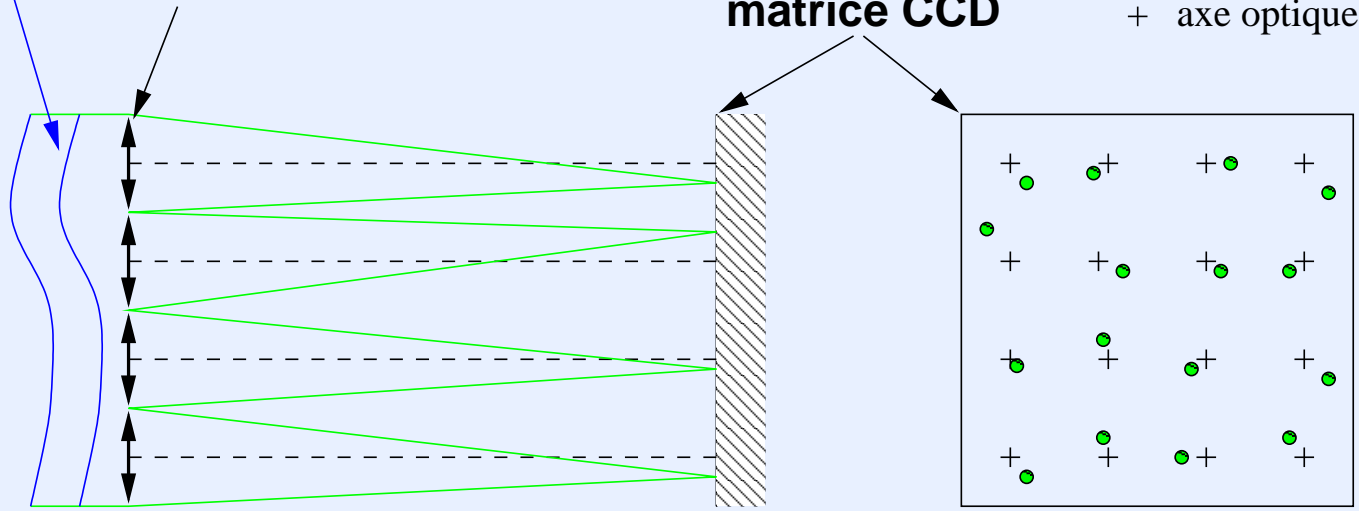
Principe du Shack-Hartmann

Front d'onde turbulent

Matrice de micro-lentilles

matrice CCD

● spot turbulent
+ axe optique



G. Rousset – Oct 2003



MESURE PAR SHACK-HARTMANN

- ☐ Centre de gravité (c_x, c_y) pour chaque imagette :

$$c_x = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \quad \text{et} \quad c_y = \frac{\sum_{i,j} y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}$$

$I_{i,j}$ intensité et $(x_{i,j}, y_{i,j})$ position du pixel (i, j)

- ☐ Interprétation

Angle d'arrivée (α_x, α_y) sur la sous-pupille :

$$\alpha_x = \frac{\lambda}{2\pi \mathcal{S}_{sspp}} \int_{sspp} \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx dy = c_x / f$$

f focale des microlentilles

- ☐ Choix de la focale f pour ajuster la dynamique et la sensibilité

PROPRIETES DU SHACK-HARTMANN

❑ De par son principe :

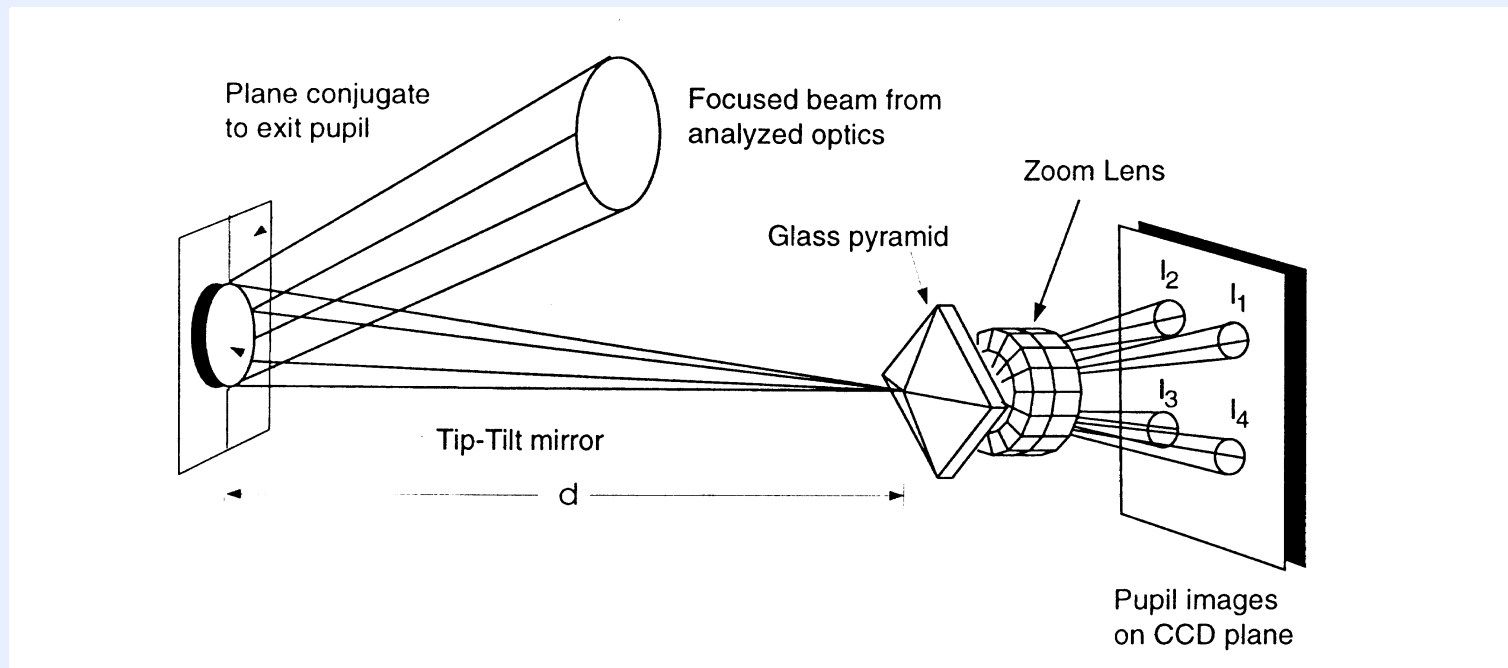
- ➡ **Achromatique**
- ➡ **Scène très étendue (contraste)**
- ➡ **Domaine isoplanétique accessible**
- ➡ **Peu sensible à la scintillation**

❑ Caractéristiques instrumentales :

- ➡ **Compact, pas de pièce mobile**
- ➡ **Utilisation de CCD aminci éclairé face arrière**
- ➡ **Traitement numérique des signaux pixels**
- ➡ **Au minimum 4 pixels par sous-pupille**

PRINCIPE DE L'ANALYSEUR A PYRAMIDE

(R. Ragazzoni)



Pyramide à 4 faces projetant 4 images de la pupille sur un CCD

G. Rousset – Oct 2003



MESURE PAR L'ANALYSEUR A PYRAMIDE

□ Approximation optique géométrique

$$\frac{I_1 + I_4 - I_2 - I_3}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \simeq \frac{\lambda}{\pi^2 \theta_{mod}} \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

θ_{mod} amplitude angulaire de modulation

□ Choix de θ_{mod} pour optimiser la dynamique et la sensibilité

☞ si $\theta_{mod} \sim \frac{\lambda}{r_o}$: linéarité pour les tous ordres (fermeture boucle)

☞ si $\theta_{mod} \sim \frac{\lambda}{D_{tel}}$: grande sensibilité aux bas ordres (gain en boucle fermée),
non linéarité pour les hauts ordres

PROPRIETES DE L'ANALYSEUR A PYRAMIDE

❑ De par son principe :

- ➡ Achromatique (diffraction ?)
- ➡ Objet pas trop étendu (remplace la modulation)
- ➡ faible repliement
- ➡ Peu sensible à la scintillation

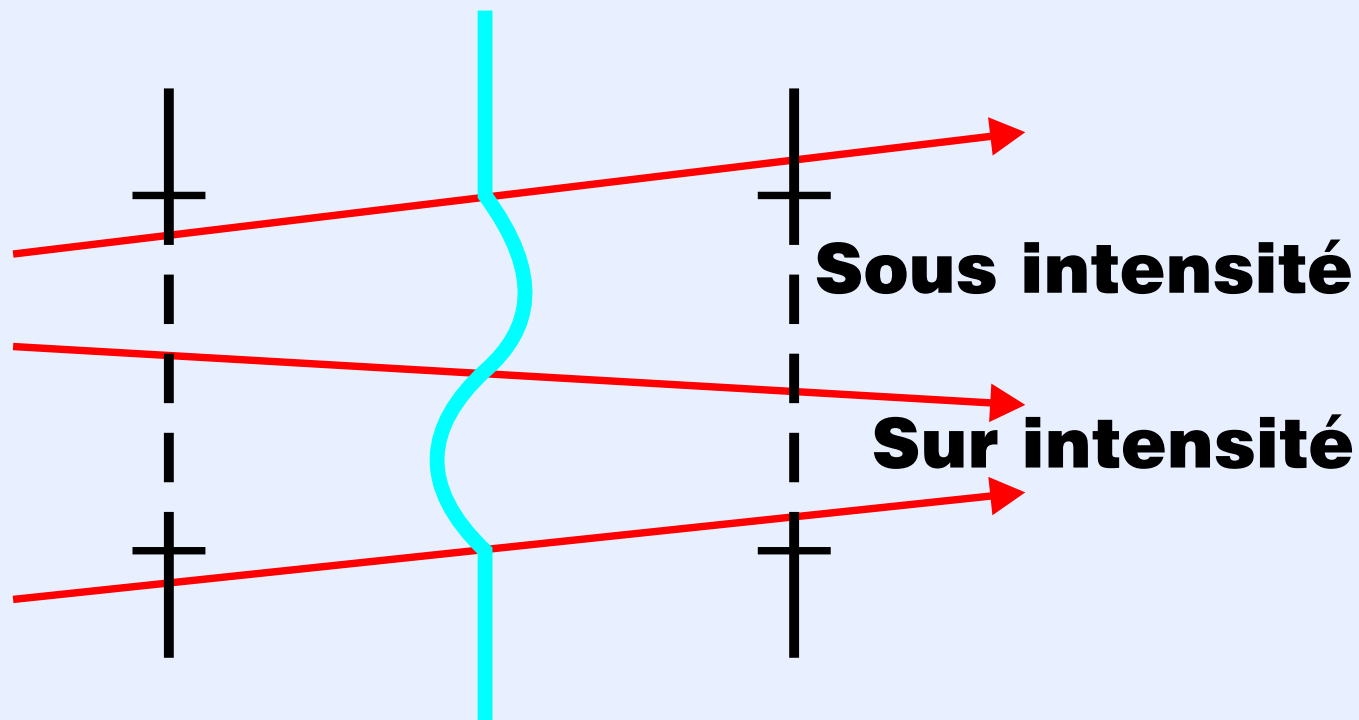
❑ Caractéristiques instrumentales :

- ➡ Utilisation de CCD aminci éclairé face arrière
- ➡ Reconfiguration simple du nombre de sous pupilles
- ➡ 4 pixels par sous-pupille
- ➡ Souplesse d'emploi par ajustement de θ_{mod}

PRINCIPE DE L'ANALYSEUR DE COURBURE

(F. Roddier)

Pupille



Onde aberrante

Plan de mesure 1

$$I_1(\vec{r})$$

Plan de mesure 2

$$I_2(\vec{r})$$

ONERA

MESURE PAR L'ANALYSEUR DE COURBURE

- Approximation de champ proche

Distance plan de mesure - plan pupille : $L \leq r_o^2/\lambda$

- Equation de transport de l'intensité :

$$\frac{I_1(\vec{r}) - I_2(-\vec{r})}{I_1(\vec{r}) + I_2(-\vec{r})} = \frac{\lambda L}{2\pi} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}}(\vec{r}) \delta_c - \nabla^2 \varphi(\vec{r}) \right]$$

I_1 et I_2 intensités dans les deux plans de mesure

$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}}$ dérivée radiale de la phase dans la pupille

δ_c distribution de Dirac linéaire en bord de pupille

$\nabla^2 \varphi$ courbure de la phase dans la pupille

- Choix de L pour optimiser la dynamique et la sensibilité

PROPRIETES DE L'ANALYSEUR DE COURBURE

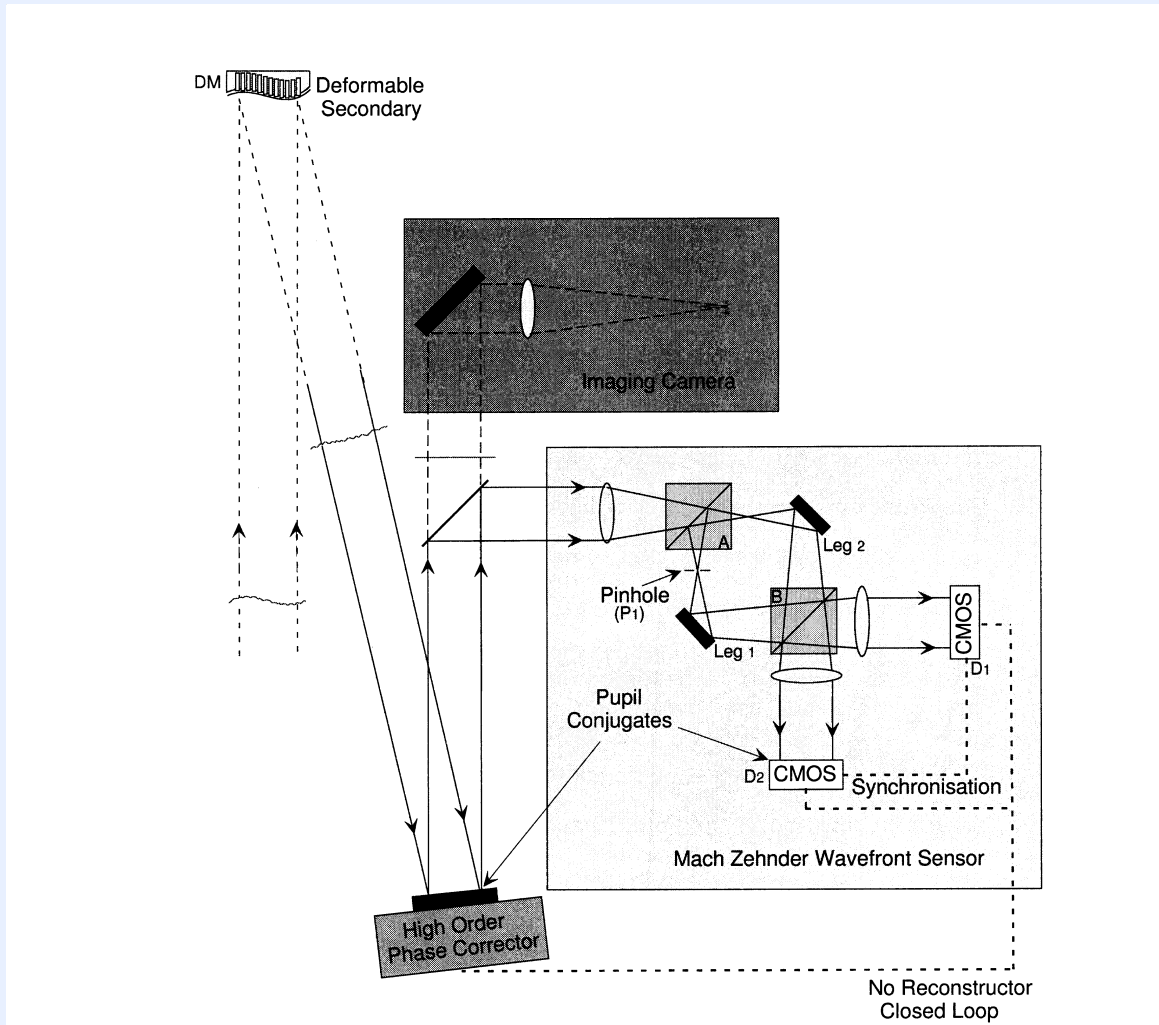
❑ De par son principe :

- ➡ Achromatique
- ➡ Objet pas trop étendu (ajuster L)
- ➡ Peu sensible à la scintillation

❑ Caractéristiques instrumentales :

- ➡ Parfaitement adapté aux miroirs à courbure
- ➡ Utilisation de photodiodes à avalanche
- ➡ Seulement 2 pixels par sous-pupille
- ➡ Souplesse d'emploi par ajustement de L

PRINCIPE DU MACH-ZENDER



G. Rousset – Oct 2003

Mesure directe de la phase dans la pupille



BRUIT DE MESURE DES ANALYSEURS

Variance de la différence de phase mesurée sur une sous-pupille : $\sigma_{\Delta\varphi}^2$

❑ Bruit de photons :

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

n_{ph} nombre de photoélectrons dans la sous-pupille

d diamètre de la sous-pupille

θ largeur angulaire de l'image :

☞ λ/d si point source et limitée par la diffraction

☞ λ/r_o si point source et limitée par la turbulence

☞ θ_{objet} si objet résolu

Avec 100 photoélectrons, $\sigma_{\Delta\varphi} \sim \lambda/25$

❑ Bruit de fond :

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

n_{bg} nombre de photoélectrons du fond

AUTRES ERREURS DE MESURE DES ANALYSEURS

❑ Bruit de lecture des détecteurs

❑ Erreurs “instrumentales”

☞ Shack-Hartmann

✓ échantillonnage, fenêtrage, seuillage

☞ Analyseurs de courbure, pyramide

✓ Diffraction

✓ Choix de L et θ_{mod}^{-1} :

Grande valeur \Rightarrow accroissement sensibilité mais non-linéarité

Petite valeur \Rightarrow accroissement dynamique/linéarité mais repliement

❑ Erreurs de calibration



RECONSTRUCTION DE FRONT D'ONDE

Les mesures m : phase, dérivées premières ou secondes

❑ Relation de base : $m = D\varphi + \text{bruit}$

D matrice d'interaction, φ phase inconnue

👉 Approche zonale, par discrétisation $\varphi_{i,j}$

👉 Approche modale, décomposition sur une base de modes $\{Z_i\}$:

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_i \varphi_i Z_i(\vec{r})$$

❑ Relation à obtenir : $\varphi = Bm$

B matrice de reconstruction

Moindres carrés, maximum a posteriori, variance de phase minimum

PROPAGATION DU BRUIT DANS LA RECONSTRUCTION

Hypothèse : Bruit de mesure blanc et uniforme sur les sous pupilles

Coefficient de propagation = $trace(BB^t)$

❑ Shack-Hartmann / Pyramide

➡ Spectre du bruit sur la phase en k^{-2} , Zernike en $(n + 1)^{-2}$

➡ Coefficient de propagation en $\ln(N_{spp})$

❑ Analyseur de courbure

➡ Spectre du bruit sur la phase en k^{-4} , Zernike en $(n + 1)^{-4}$

➡ Coefficient de propagation en N_{spp}

❑ Diversité de phase / Mach Zender

➡ Spectre du bruit sur la phase en k^0 , Zernike en $(n + 1)^0$

➡ Coefficient de propagation ~ 1

COMPARAISON DES ANALYSEURS

❑ Shack-Hartmann :

- ➡ hauts ordres, faible repliement, objet étendu
- ➡ sensible au bruit de détecteur
- ➡ montage optique compact

❑ Pyramide :

- ➡ hauts ordres, (très) faible repliement, objet peu étendu
- ➡ sensibilité : gain attendu en D/d sur les bas ordres
- ➡ montage optique complexe

❑ Courbure :

- ➡ bas ordres, repliement, objet peu étendu
- ➡ détecteurs à comptage de photons, magnitude limite élevée
- ➡ montage optique complexe

❑ Mach Zender :

- ➡ très hauts ordres, objet ponctuel, (chromatisme ?)
- ➡ mesure directe de la phase, faible dynamique : système à 2 étages
- ➡ montage optique délicat

COMMANDE D'UNE OPTIQUE ADAPTATIVE

Deux aspects : commande spatiale et commande temporelle

❑ Reconstruction spatiale du front d'onde :

$$c_i = Bm_i$$

m_i vecteur de mesure à l'instant i

c_i vecteur de commande différentielle à l'instant i

B matrice de commande, déduite de la matrice d'interaction D

❑ Correcteur temporel du front d'onde :

👉 Bande passante et stabilité de la boucle d'asservissement

👉 Intégrateur : $C_i = C_{i-1} + gc_i$

C_i vecteur de commande appliqué au miroir déformable

g gain de la boucle à optimiser

👉 Autres correcteurs possibles : prédicteur, Kalman...



COMMANDE MODALE EN OPTIQUE ADAPTATIVE

❑ Importance de la commande modale :

- ➡ Rapport signal à bruit plus grand pour les bas ordres
- ➡ Plus grande corrélation temporelle des bas ordres
- ➡ Plus grande corrélation angulaire des bas ordres

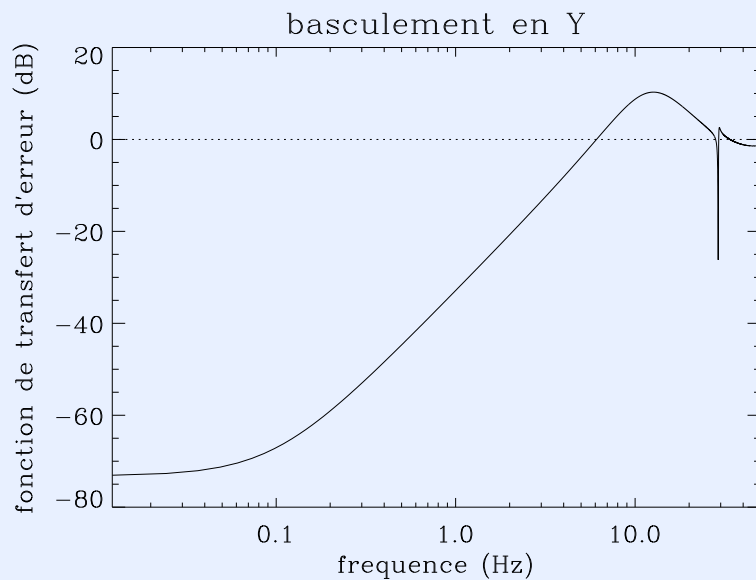
❑ Choix de la base de modes et du nombre de modes :

Modes propres du système, du miroir déformable, Karhunen-Loeve...

❑ Optimisation du correcteur temporel mode à mode

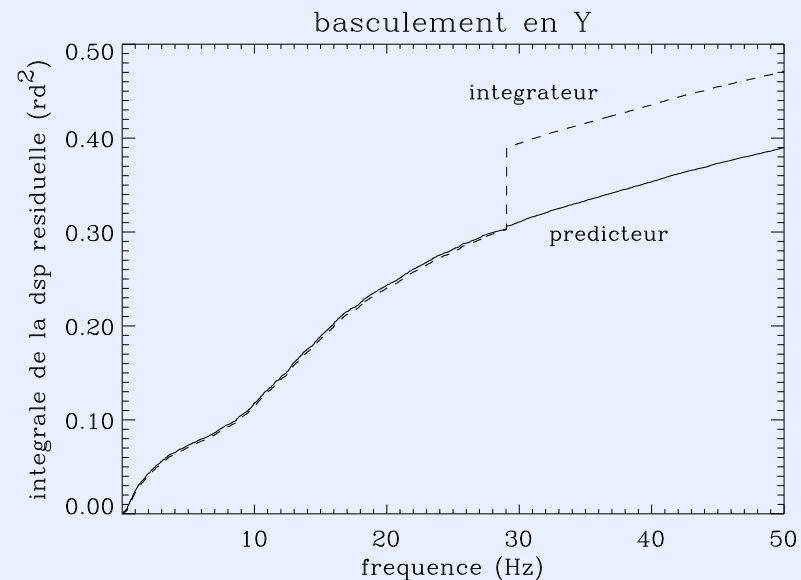
Exemple de correcteur temporel

Avec un prédicteur, correction : vibrations, retard, vent fort



fonction de tranfert de réjection

bande passante temporel : $6Hz$



intégrale de la densité spectrale

gain en variance de : $0.1rad^2$

LIMITATIONS FONDAMENTALES

☐ Luminosité de l'objet

- ☞ Bruit de mesure du front d'onde :
magnitude limite de l'étoile guide
couverture du ciel

☐ Décorrélation angulaire des fronts d'onde (Anisoplanétisme)

- ☞ Angle d'isoplanétisme (conditions moyennes) :

5arcsec à $0,5\mu m$

25arcsec à $2,2\mu m$

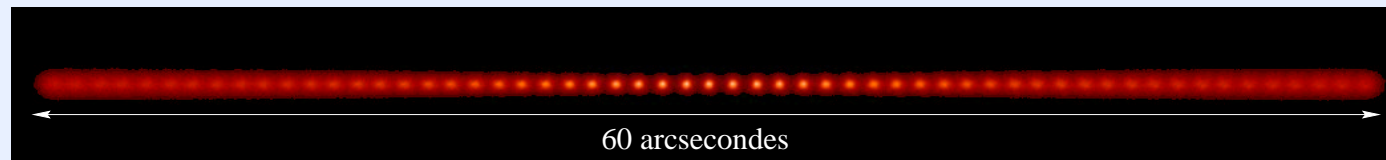
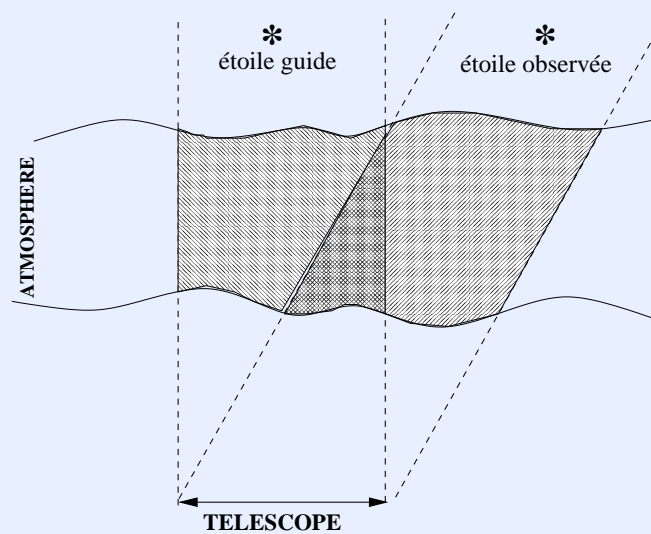
⇒ Etoile laser, optique adaptative multiconjuguée



Optique Adaptative et anisoplanétisme

Dégradation de la correction dans le champ :

réponse impulsionnelle dépendante de la position dans le champ



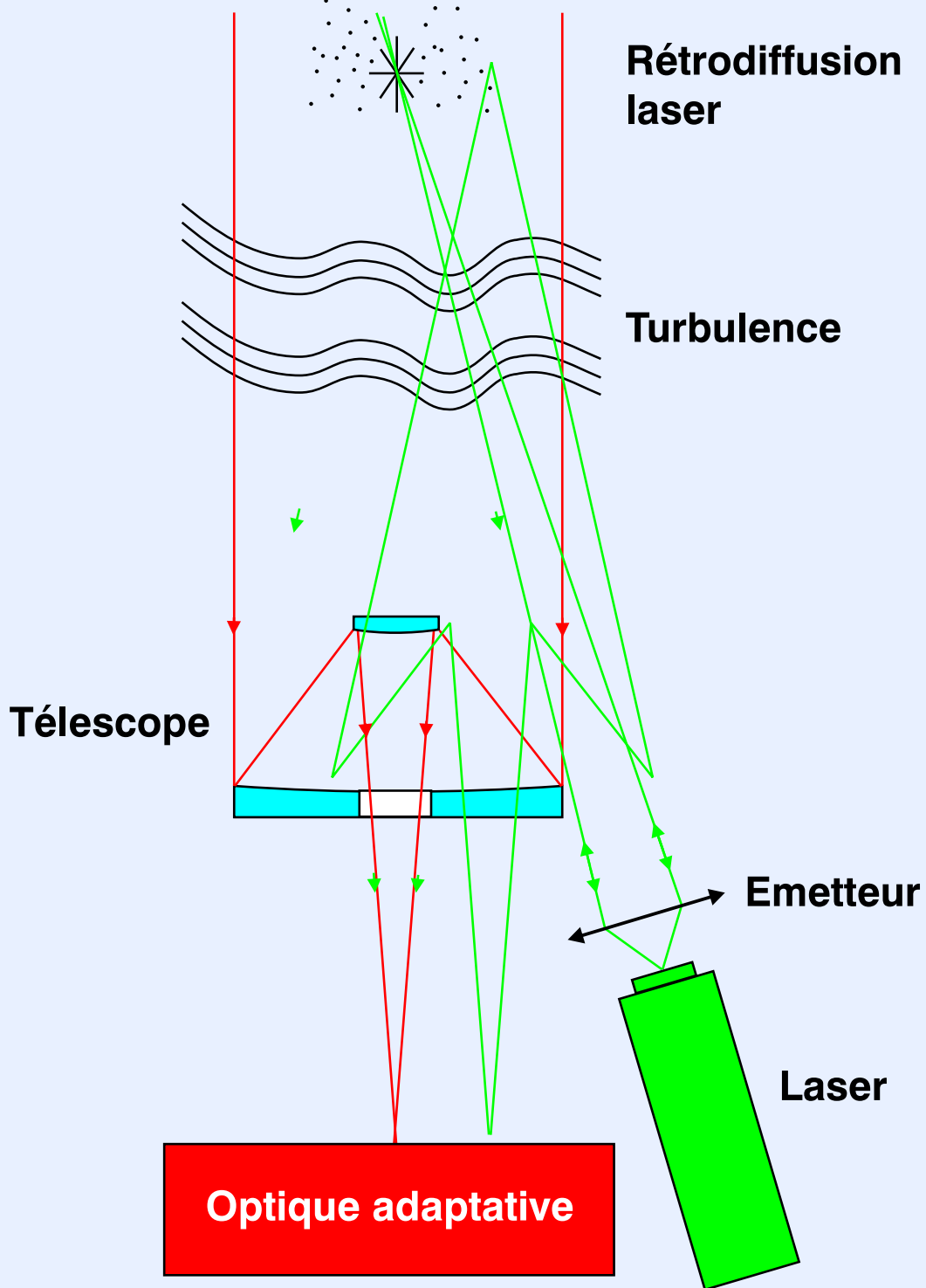
$$D = 4m, D/r_o = 6 \text{ à } 2, 2\mu m$$

21 modes corrigés : $SR = 40\%$ sur l'axe, 9% en bord de champ

PRINCIPE DE L'ETOILE LASER



But : étendre la couverture du ciel



Difficultés : pas de mesure du tilt, effet de cône

COMMENT ACCROITRE LE CHAMP CORRIGE ?

❑ Anisoplanétisme due aux hautes couches turbulentes

Dans chaque couche : $\langle (\varphi(\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r} + \boldsymbol{\rho}))^2 \rangle \propto C_n^2(h) \rho^{5/3}$

Force de la turbulence à l'altitude h donnée par :

$C_n^2(h)$, constante de structure de l'indice n

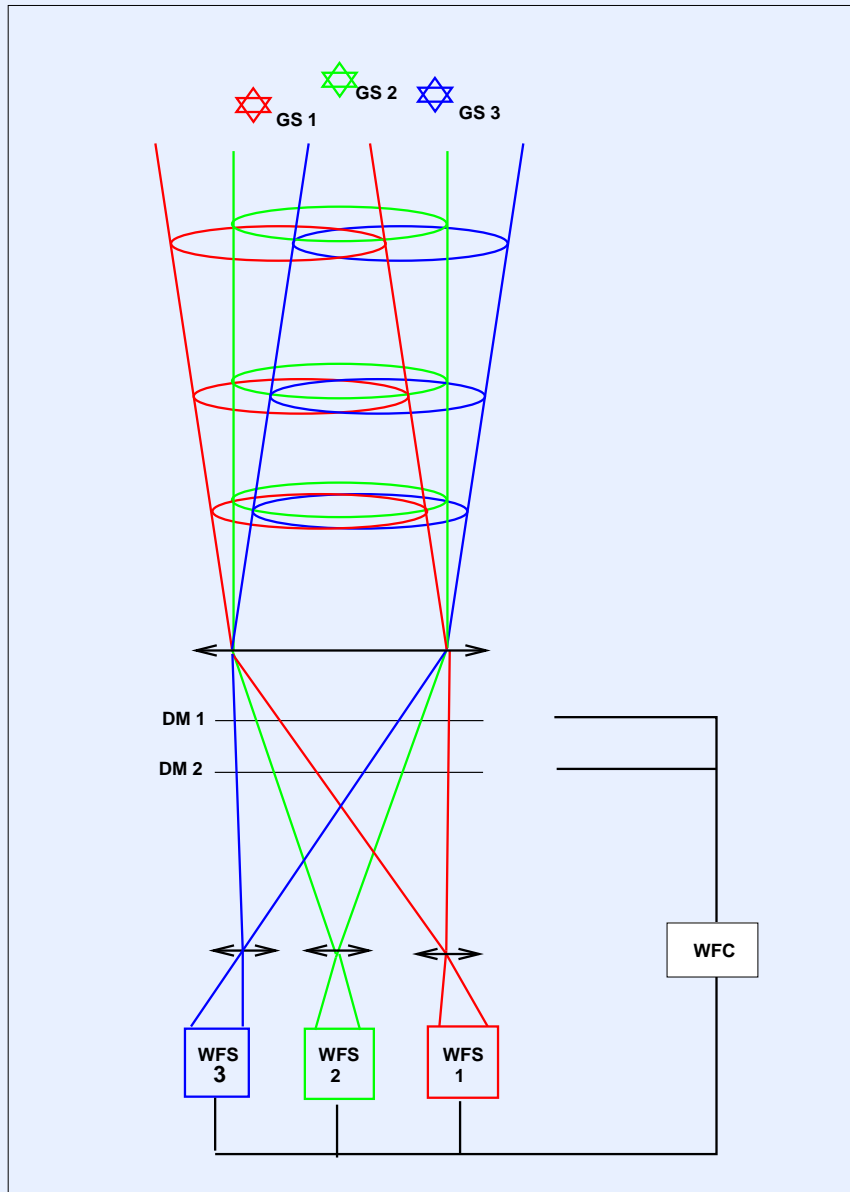
❑ Pour corriger les couches hautes les plus turbulentes, conjuguer des miroirs déformables avec ces couches et mesurer le front d'onde dans plusieurs directions:

Optique Adaptative Multi-Conjuguée (OAMC)

❑ Optique adaptative classique

(1 miroir dans la pupille, 1 direction de mesure) :

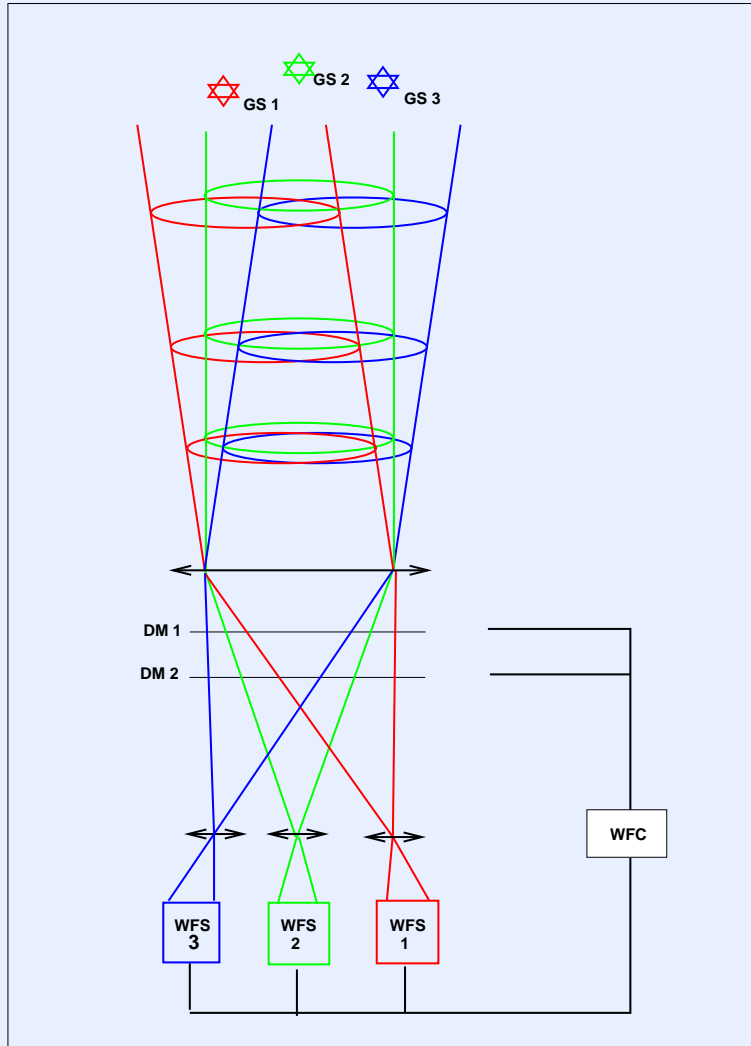
Insuffisant pour une bonne correction dans le champ



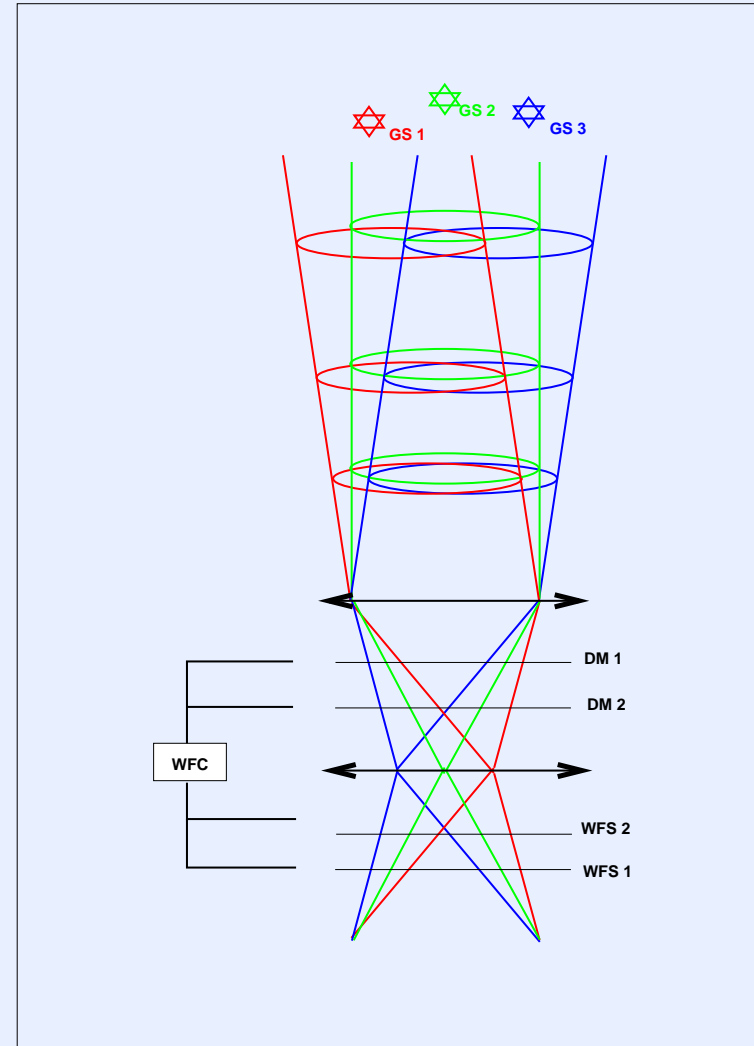
Optique Adaptative Multiconjuguée

- Performance en terme de :
 - * nombre de miroirs déformables
 - * nombre d'étoiles guides

Concepts "Star" et "Layer" oriented



Star Oriented



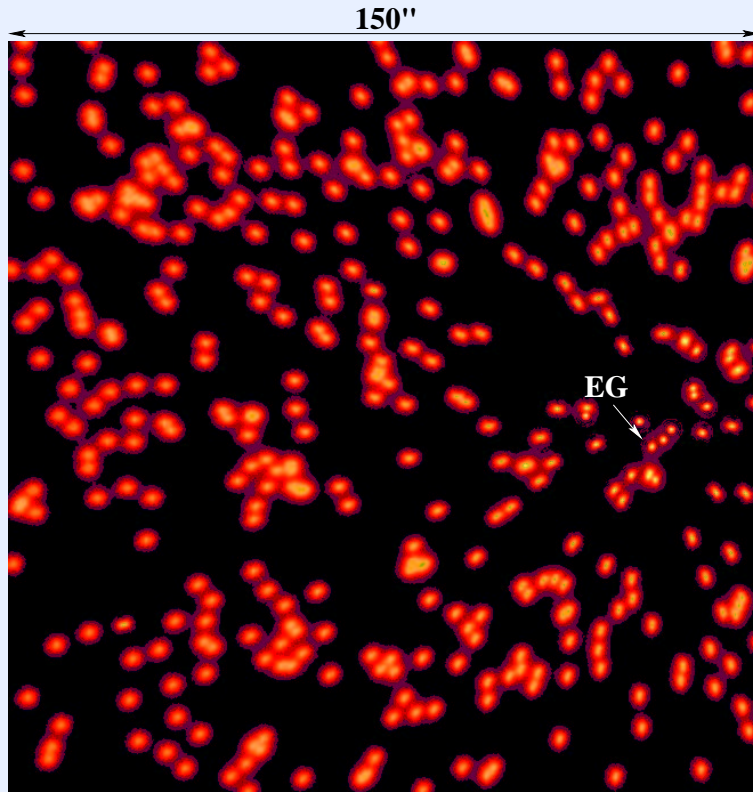
Layer Oriented

ONERA

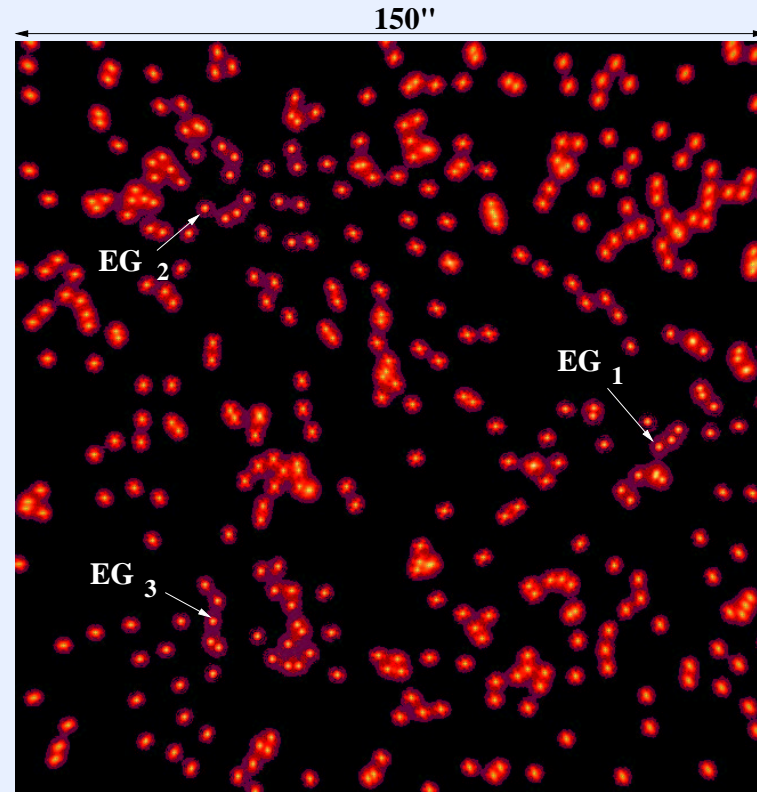
G. Rousset – Oct 2003

Exemple de simulation d'un champ d'étoiles

- Observation à $2.2\mu\text{m}$ sur un télescope de 8 m.
- 3 étoiles guides, performances ultimes: $N_{\text{MD}} = N_{\text{couches}} = 3$



OA classique



OAMC

ONERA

DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME D'OA

Expression du besoin en terme de rapport de Strehl : $SR \simeq \exp(-\sigma_{res}^2)$

Équilibrer le budget d'erreur de front d'onde : σ_{res}^2

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

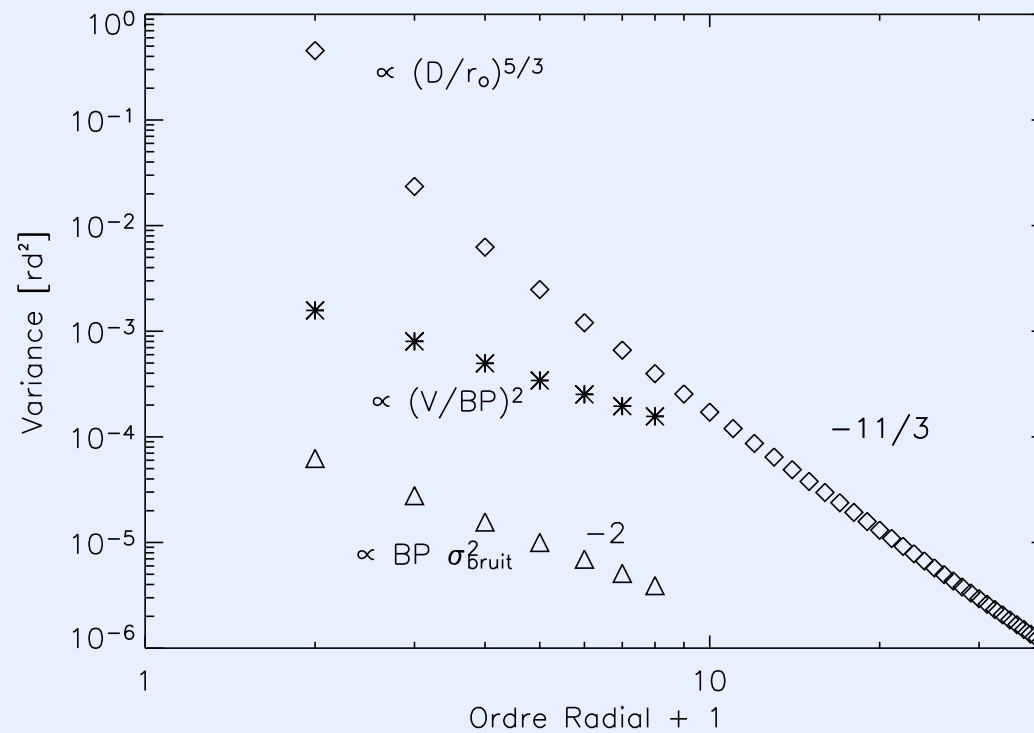
Erreur totale de boucle

Erreur totale sur l'image

- ❑ $\sigma_{fit}^2 \simeq 0.3 N_{act}^{-5/6} (D/r_o)^{5/3}$ **sous-échantillonnage spatial du front d'onde**
- ❑ σ_{alias}^2 : **repliement**
- ❑ σ_{temp}^2 : **temporelle due à la bande passante finie**
- ❑ σ_{noise}^2 : **bruit de mesure**
- ❑ σ_{aniso}^2 : **anisoplanétisme**
- ❑ σ_{calib}^2 : **calibration du système d'OA**
- ❑ σ_{aber}^2 : **aberrations non vues par l'AO**

EXEMPLE DE VARIANCE RESIDUELLE

$$\sigma_{res}^2 = \sigma_{fit}^2 + \sigma_{temp}^2 + \sigma_{noise}^2$$



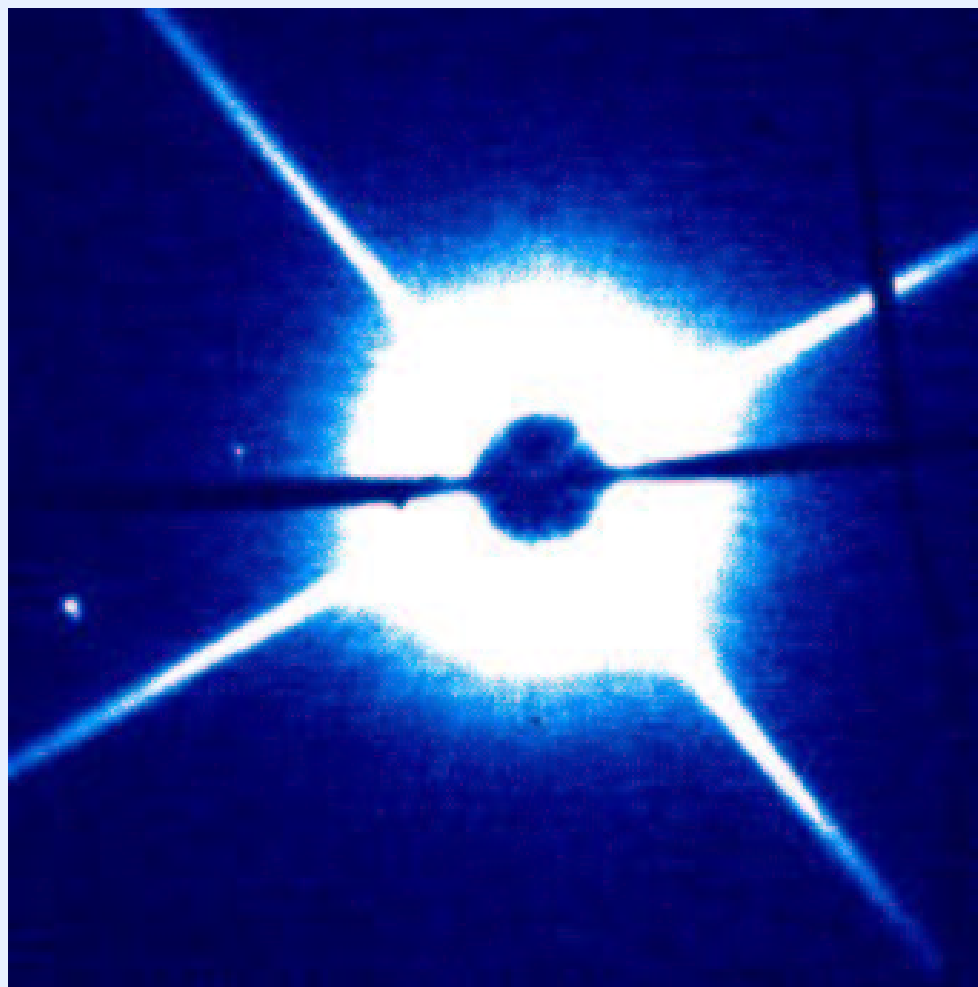
Conclusion - perspectives

- ❑ L'optique adaptative est une technologie mature :
classiquement SR sur axe $\sim 50 - 70\%$ sur un $8m$
- ❑ Nouvelle génération de systèmes pour étendre le domaine d'emploi sur télescopes de classe 8-10 m
 - ➡ OA multiconjuguée pour grand champ : multicouche ou "ground layer"
(études de base, MAD à l'ESO, Gemini Sud)
 - ➡ Etoile laser polychromatique : démonstration de faisabilité
 - ➡ OA répartie type Falcon : très grands champs (développement boutons)
 - ➡ Optique adaptative à très haut Strehl : étude de concept VLT-PF
 - ➡ Développements technologiques : miroirs, CCD
- ❑ Optique adaptative pour les ELT
 - ➡ Système classique faisable aujourd'hui pour les 20-30 m
 - ➡ Ruptures technologiques et nouveaux concepts pour les 100m
 - ➡ Etude Opticon pour un ELT européen

Image NAOS de compagnons faibles

Bande K_s , pose 150s, coronographe 0.7arcsec

Compagnons : séparation 2.8 et 4.8arcsec, ΔK 12.2 et 10.2



G. Rousset – Oct 2003

ONERA