

Imagerie à travers la turbulence atmosphérique (et introduction à l'optique adaptative)

Marcel Carbillet

[marcel.carbillet@unice.fr]

[<http://lagrange.oca.eu/marcel/enseignement>]

Menu

- Imagerie astronomique à haute résolution angulaire
- Turbulence atmosphérique
- Génération de fronts d'onde perturbés
- Formation de l'image résultante (+bruits!)
- Introduction à la *speckle interferometry*
- Introduction à l'Optique adaptative (OA)
- Budget d'erreur post-OA
- Étude de l'erreur d'anisoplanétisme (OA parfaite)

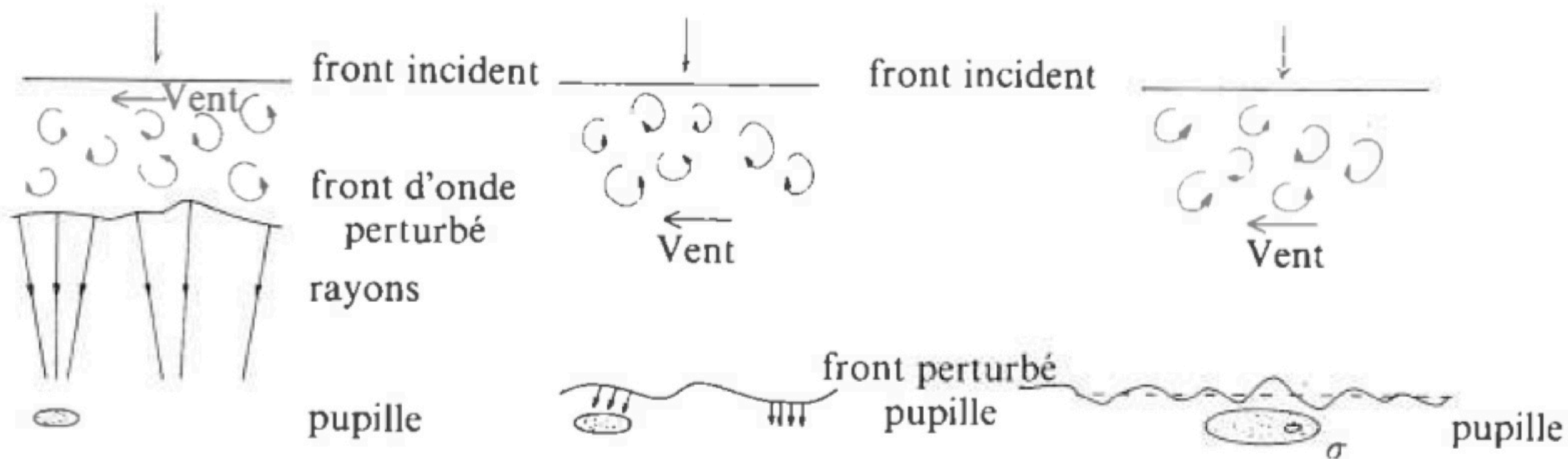
Images et turbulence

L'image formée à travers l'atmosphère turbulente (au sens optique) est dégradée :

- Scintillation = fluctuation de l'éclat.
- Agitation = variation du photocentre.
- Étalement = perte de cohérence spatiale.

Images et turbulence

L'image formée à travers l'atmosphère turbulente (au sens optique) est dégradée :



SCINTILLATION

l'énergie reçue par la pupille
varie dans le temps

AGITATION

la pente moyenne du
front d'onde sur la pupille varie

ETALEMENT

la cohérence spatiale
du front d'onde est réduite

Images et turbulence

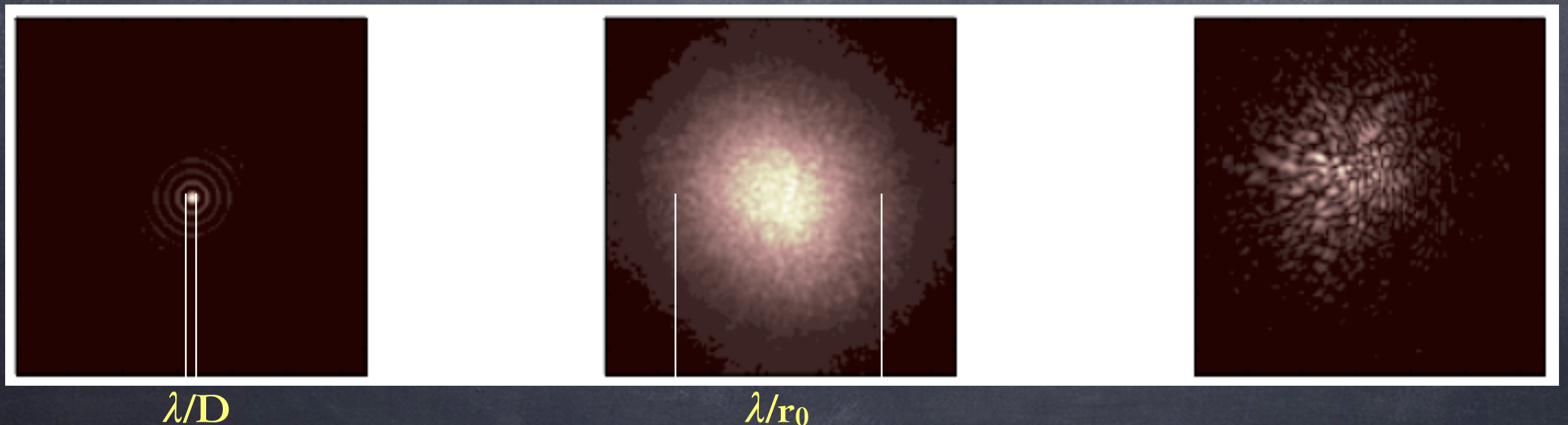
La relation objet-image qui lie l'éclairement $I(\alpha)$ dans le plan image (i.e. au foyer du télescope) à la luminance $O(\alpha)$ de l'objet (dans le ciel) est une relation de convolution impliquant la réponse impulsionnelle $S(\alpha)$ de l'ensemble télescope+atmosphère, où α est la direction de visée :

$$I(\vec{\alpha}) = O(\vec{\alpha}) * S(\vec{\alpha})$$

Images et turbulence

$$I(\vec{\alpha}) = O(\vec{\alpha}) * S(\vec{\alpha})$$

Relation valable notamment à la condition que le système soit invariant par translation (tout se passe à l'intérieur du domaine d'isoplanétisme)...



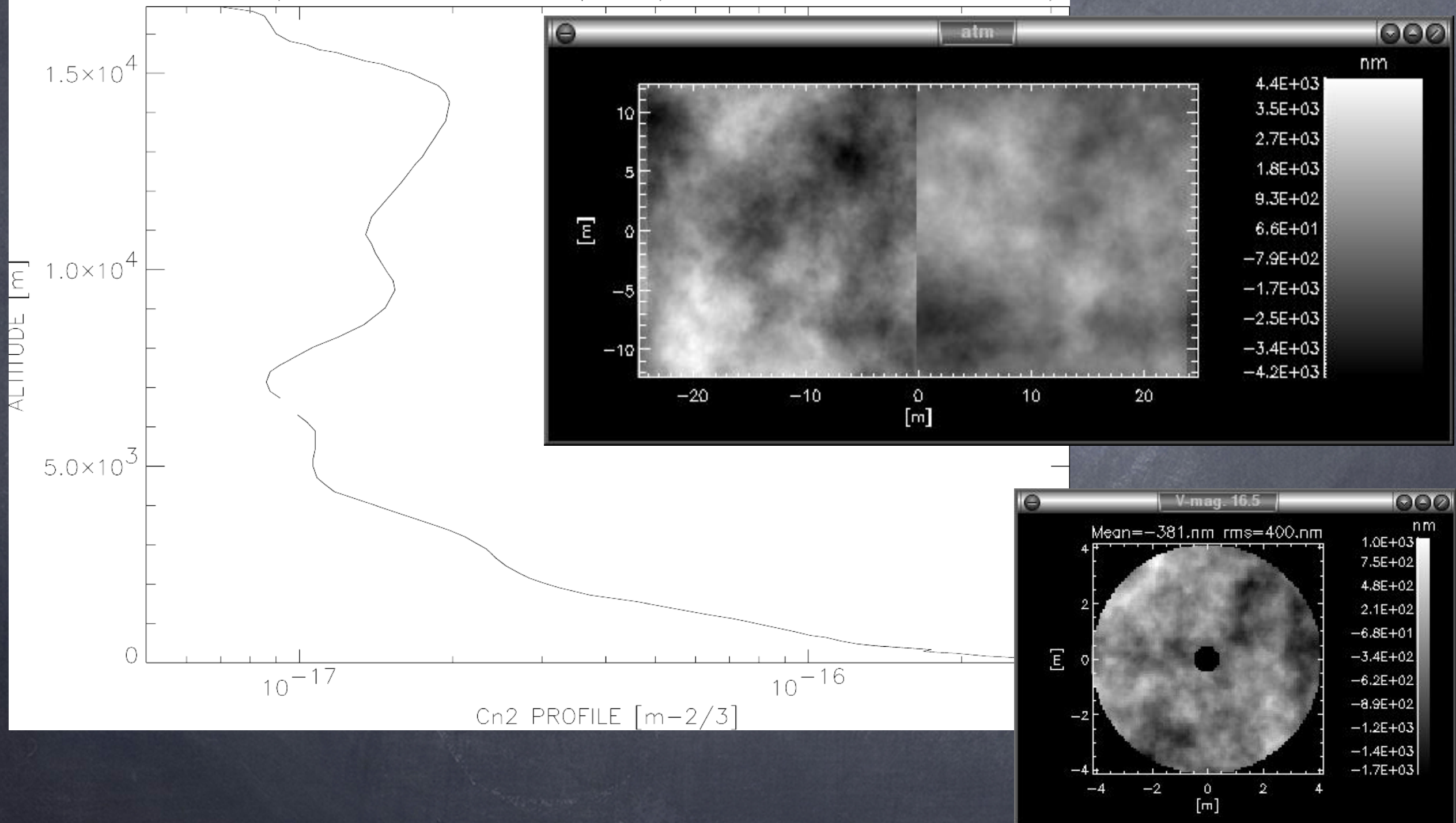
Images et turbulence

Quelques ordres de grandeur concernant l'atmosphère turbulente :

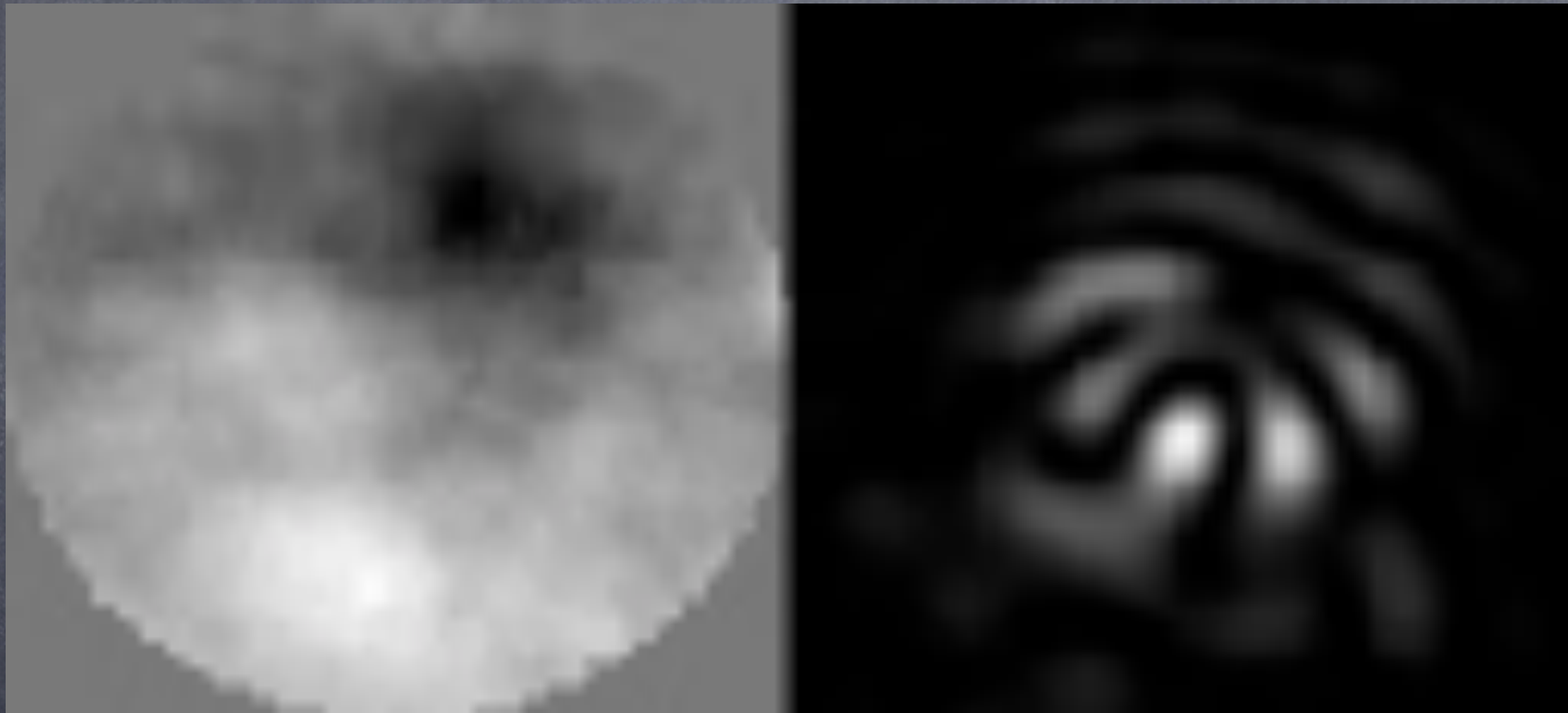
	$\lambda = 500 \text{ nm}$	$\lambda = 2.2 \mu \text{m}$
paramètre de Fried r_0	$\rightarrow 10 \text{ cm}$	60 cm
vitesse des couches turbulentes (v)	$\rightarrow 10 \text{ m/s}$	id.
=> FWHM d'une image ($\varepsilon \approx \lambda / r_0$)	$\rightarrow 1''$	$\sim 1''$
=> temps caractéristique ($\tau_0 \propto r_0 / v$)	$\rightarrow 3 \text{ ms}$	18 ms

Images et turbulence

Paranal profile from balloons (extrapolated from Sarazin 1995)



Images et turbulence



Images et turbulence

Le front d'onde est, à $\lambda/2\pi$ près, la phase $\phi(r)$ de l'onde $\psi(r)$ qui a traversé l'atmosphère turbulente avant de parvenir au télescope :

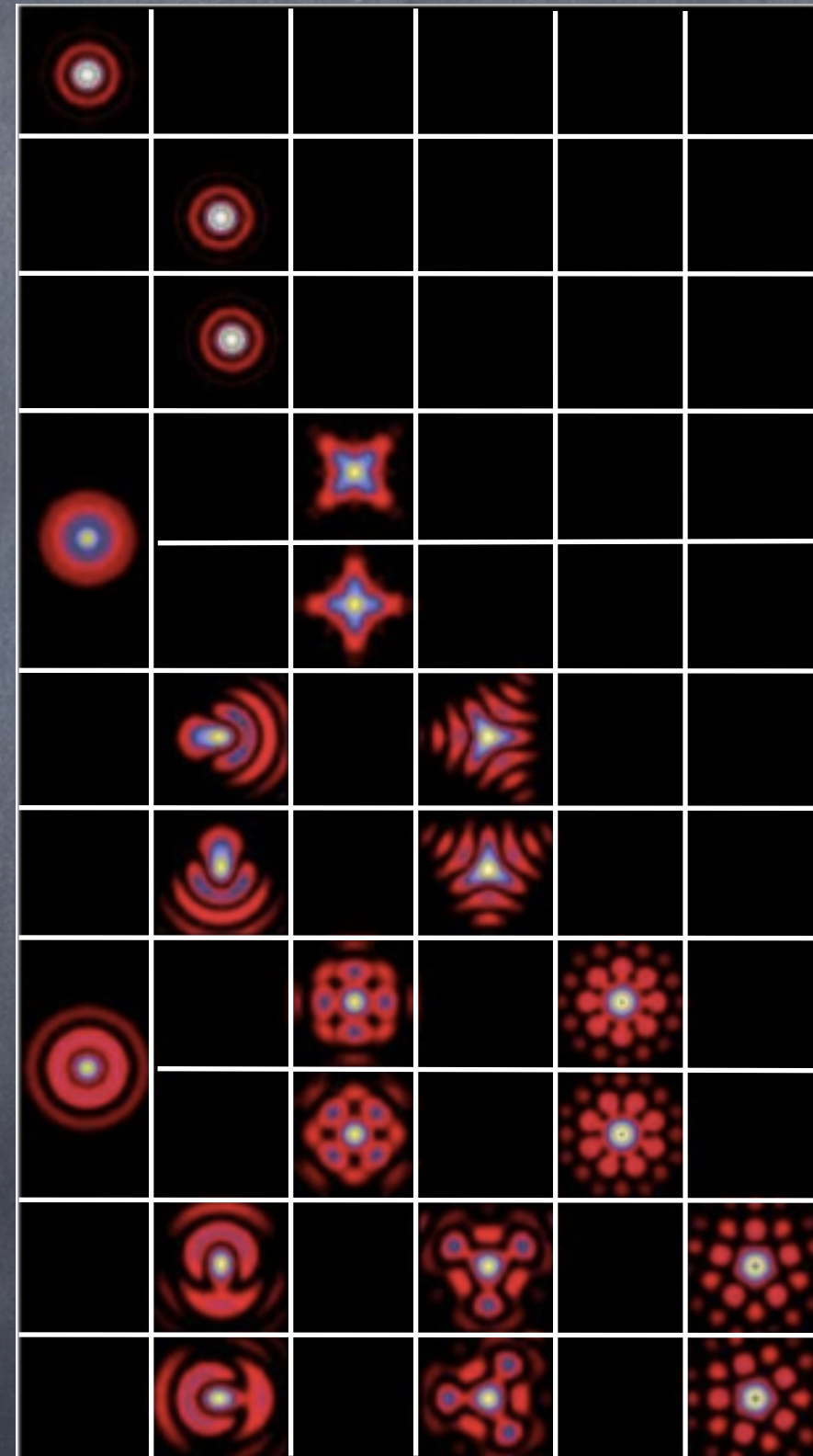
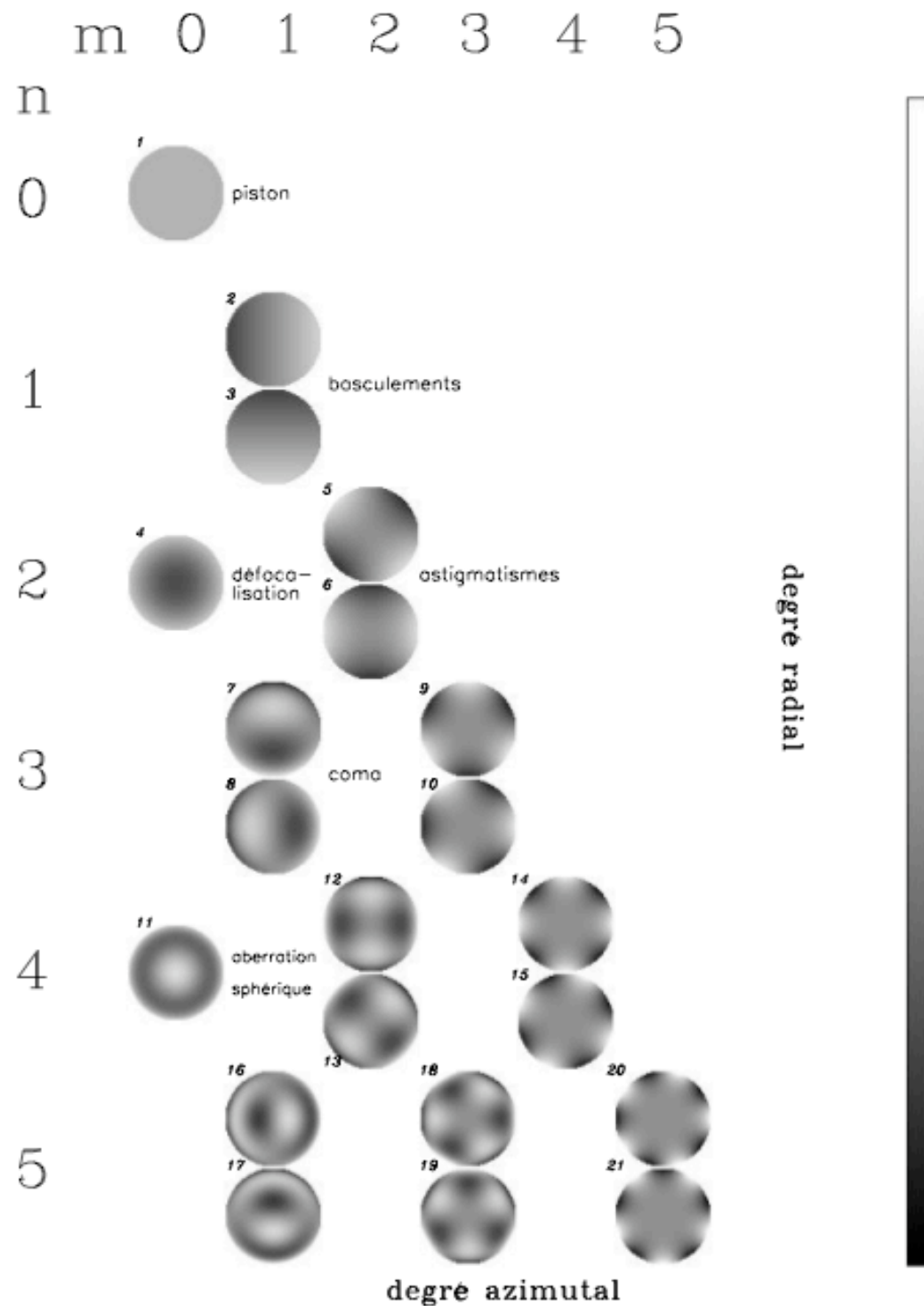
$$\Psi(\vec{r}) = A(\vec{r}) \exp\{i\Phi(\vec{r})\}$$

Cette phase peut se décomposer selon une base de polynômes, par exemple ceux de Zernike :

$$\Phi(\vec{r}) = \sum_i a_i Z_i(\vec{r})$$

Images et turbulence

polynômes de Zernike



Images et turbulence

$$r_0 = 0.185 \lambda^{\frac{6}{5}} \cos(\gamma)^{\frac{3}{5}} \left[\int_0^\infty C_n^2(z) dz \right]^{-\frac{3}{5}}$$

r_0 en bande H sachant r_0 à 500nm ?...

$$\tau = 0.36 \frac{r_0}{v}$$

$$\epsilon = 0.98 \frac{\lambda}{r_0}$$

$$\theta = 0.36 \frac{r_0}{h}$$

$$N_s \simeq 0.34 \left(\frac{D}{r_0} \right)^2$$

Nombre de speckles pour $r_0=10\text{cm}$ et $D=1\text{m}$?...

Images et turbulence

r_0 en bande H sachant r_0 à 500nm ?...

$$r_0 = 0.185 \lambda^{\frac{6}{5}} \cos(\gamma)^{\frac{3}{5}} \left[\int_0^\infty C_n^2(z) dz \right]^{-\frac{3}{5}}$$

$$r_0^{H=1.65 \mu m} = r_0^{500 \text{ nm}} \left(\frac{1.65}{0.5} \right)^{\frac{6}{5}} \simeq 0.42$$

Nombre de speckles pour $r_0=10\text{cm}$ et $D=1\text{m}$?...

$$N_S^{500 \text{ nm}} \simeq 0.34 \left(\frac{1.0}{0.1} \right) \simeq 34$$

$$N_S^H \simeq 0.34 \left(\frac{1.0}{0.42} \right) \simeq 2$$

Images et turbulence

$$\Phi_{\varphi}(\vec{\nu}) = 0.0228 \, r_0^{-\frac{5}{3}} \left(\nu^2 + \frac{1}{\mathcal{L}_0^2} \right)^{-\frac{11}{6}}$$

Modèle de Kolmogorov/von Kármán

- Kolmogorov : échelle externe $\mathcal{L}_0$ infinie.
- On peut affiner en considérant aussi l'échelle interne ℓ_0 .
- $\exists$ d'autres modèles avec $\mathcal{L}_0$ finie et ℓ_0 non-nulle.

The well-known FFT method allows us to generate phase screens $\varphi(\vec{r})$, where $\vec{r}$ is the two-dimensional position within the phase screen, assuming usually either a Kolmogorov or a von Karman spectrum $\Phi_\varphi(\vec{\nu})$, where $\vec{\nu}$ is the two-dimensional spatial frequency, from which is computed the modulus of $\tilde{\varphi}(\vec{\nu})$, the Fourier transform of $\varphi(\vec{r})$. Assuming the near-field approximation and small phase perturbation [3], the von Karman/Kolmogorov spectrum is given by

$$\Phi_\varphi(\vec{\nu}) = 0.0229 r_0^{-\frac{5}{3}} \left(\nu^2 + \frac{1}{\mathcal{L}_0^2} \right)^{-\frac{11}{6}}, \quad (1)$$

where r_0 is the Fried parameter and $\mathcal{L}_0$ is the wavefront outer scale (infinite for the Kolmogorov model). Within the framework of the classical FFT-based technique, a turbulent phase screen $\varphi_L(\vec{r})$ of physical length L is obtained by taking the inverse FFT of $\tilde{\varphi}_L(\vec{\nu})$, the modulus of which is obtained from Eq. (1) by applying the definition of the power spectrum, which is

$$\begin{aligned} \Phi_\varphi(\vec{\nu}) &= \lim_{L \rightarrow \infty} \left(\frac{\langle |\tilde{\varphi}_L(\nu)|^2 \rangle}{L^2} \right) \\ \Rightarrow |\tilde{\varphi}_L(\nu)| &\simeq L r_0^{-\frac{5}{6}} \sqrt{0.0228} \left(\nu^2 + \frac{1}{\mathcal{L}_0^2} \right)^{-\frac{11}{12}}, \quad (2) \end{aligned}$$

and which phase is random and uniformly distributed.

The obtained phase screen is thus numerically written

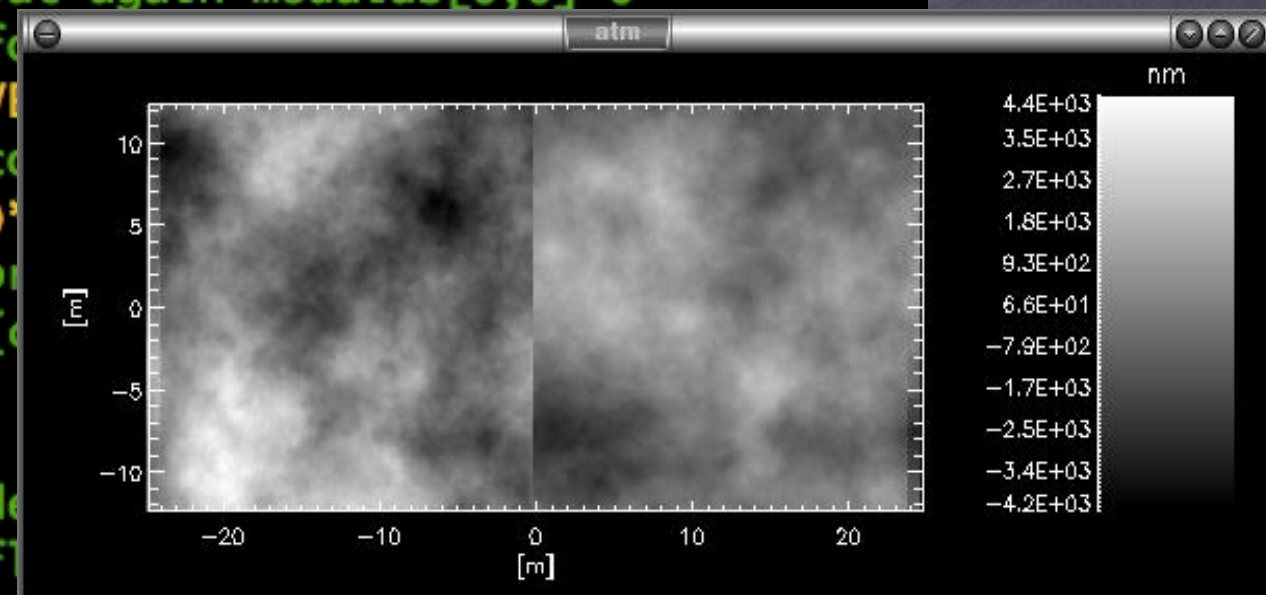
$$\varphi_L(i,j) = \sqrt{2} \sqrt{0.0228} \left(\frac{L}{r_0} \right)^{\frac{5}{6}} \left\{ \text{FFT}^{-1} \left[\left(k^2 + l^2 + \left(\frac{L}{\mathcal{L}_0} \right)^2 \right)^{-\frac{11}{12}} \exp\{i\theta(k,l)\} \right] \right\}, \quad (3)$$

where i and j are the indices in the direct space, k and l are the indices in the FFT space, $\{ \}$ stands for either *real part of* or *imaginary part of*, i is the imaginary unit, and θ is the random uniformly distributed phase (between $-\pi$ and π). The factor $\sqrt{2}$ comes from the fact that here we use both the real and imaginary parts of the original complex generated FFT phase screens, which are independent one from the other [4]. This kind of phase screen suffers, however, from the lack of spatial frequencies lower than the inverse of the necessarily finite length L of the simulated array.


```

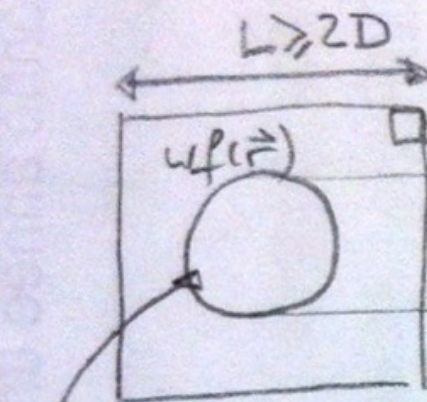
1 function wfgeneration, dim, length, L0, r0, lambda, SEED=seed
2 ;
3 ; wave-front (wf) generation following Kolmogorov or von Karman model
4 ;
5 ; dim      = wf linear dimension [px],
6 ; length   = wf physical length [m],
7 ; L0       = wf outer-scale [m],
8 ; seed     = random generation seed (OPTIONAL),
9 ; r0       = Fried parameter at wavelength 'lambda' [m],
10 ; lambda   = wavelength at which r0 is defined.
11 ;
12 ; Marcel Carillet [marcel.carillet@unice.fr],
13 ; UMR 7293 Lagrange (UNS/CNRS/OCA), February 2013.
14 ;
15 ; Last modification: Feb. 2014
16 ;
17 phase = (randomu(seed,dim,dim)-.5) * 2*!PI ; rnd uniformly distributed phase
18 ; (between -PI and +PI)
19 rr = dist(dim)
20 if L0 eq !VALUES.F_INFINITY then rr[0,0] = 1.; avoid 1/infinity afterwards
21 ; for Kolmogorov model
22 modul = (rr^2+(length/L0)^2)^(-11/12.) ; vonKarman/Kolmogorov model
23 if L0 eq !VALUES.F_INFINITY then modul[0,0] = 0.
24 ; put again modulus[0,0]=0
25 ; for von Karman model
26 screen = fft(modul*exp(complex(0,1)*phase), /INVT) ; compute FFT
27 ; compute the complex conjugate
28 screen *= sqrt(2)*sqrt(.0228)*(length/r0)^(5/6.) ; apply the constant
29 ; and the wavelength
30 ; compute the complex conjugate
31 screen -= mean(screen) ; remove the DC component
32 ; compute the complex conjugate
33 return, screen ; return the screen
34 ; final processing
35 end

```



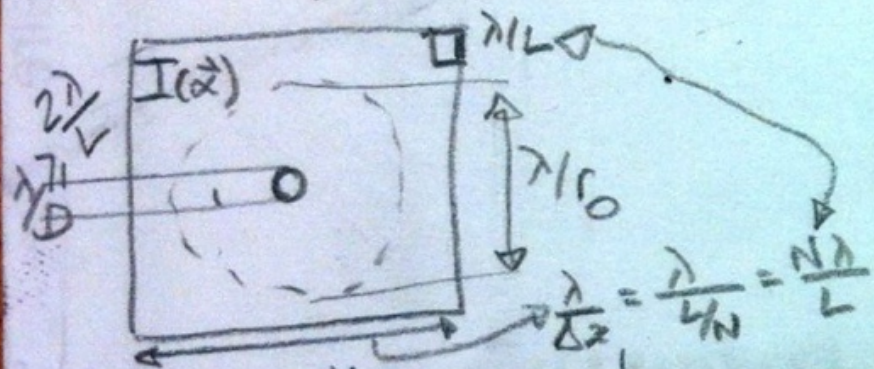
Images et turbulence

→ Formation d'image



$w(r) \cdot P(r)$

$|FFT(\vec{r}) A e^{i\phi(r)} P(r)|^2$

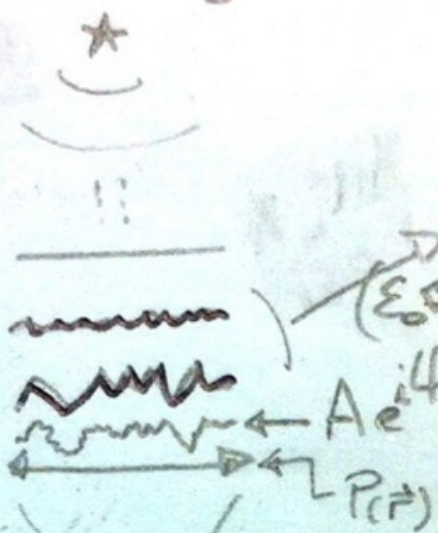


→ routine `makepup.pro` (fonction `dem`, `diam`, `cohs`)
 → routine `image.pro` (fonction `image`, `pup`, `wf`, `lambda`)

→ tâche d'Airy avec `pup` = pupille circulaire (`makepup`), `wf` = 1 partout.

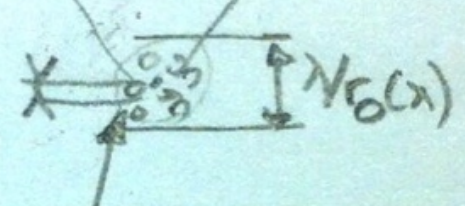
→ faire varier `Delta lambda`
 → speckles avec `wfimg.pro` qui appelle `wfgeneration.pro` et `image.pro`.

→ faire varier `r0` (pour avoir $\frac{\lambda}{r0} = 0.5, 1, 2$)



$\Delta T \Rightarrow \Delta n \Rightarrow \Delta t \Rightarrow \Delta l = c \Delta t$
 $(\epsilon \ll r0, \sigma_0 \ll r0, Q \ll C_n(r))$

$A e^{i\phi}, \phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} w(r) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \delta(r)$



$S(r) = |TF\{A \cdot P(r) \cdot \exp\{i\phi(r) \cdot P(r)\}\}|^2; A=1$

$\Rightarrow S(r) = |TF\{P(r) \cdot \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \delta(r) \cdot P(r))\}|^2$

$\frac{2\pi}{\lambda} \delta(r)$
 $2 \times \text{diam}(\text{Shannon})$

h

Images et turbulence

```
function wfimg, length, r0, L0, lambda_r0, obs, dim, diam, lambda_psf, SEED=seed
function img;
; use:
; length      = 8.      ; [m] dimension physique des écrans de phase
; image comp; r0       = .1    ; [m] parametre de Fried
; L0          = 25.     ; [m] echelle externe
; lambda_r0   = 500E-9   ; [m] longueur d'onde dans laquelle est définit r0
; pup        = 1; obs     = 0. [0-1] ; rapport entre l'obstruction centrale et le diametre du telescope
; wf         = 1; dim     = 512L  ; [px] dimension des ecrans de phase
; lambda     = 1; diam    = dim/8  ; [px] dimension de la pupille d'entree du telescope
; lambda_psf = 500E-9   ; [m] longueur d'onde d'observation de la PSF
; seed       = 1224L    ; germe pour la generation aleatoire des ecrans de phase (OPTIONAL KEYWORD)
;
; Marcel Car;
; UMR 7293 I;
;
; sub-routines needed:
; image.pro, wfgeneration.pro, makepup.pro
;
; Last modif;
;
; Marcel Carillet [marcel.carillet@unice.fr],
; UMR 7293 Lagrange (UNS/CNRS/OCA), February 2013.
dim = (size(
img = (abs(
img = shift(
dummy = wfgeneration(dim,length,L0,r0,lambda_r0,SEED=seed)
wf1   = float(dummy)
wf2   = imaginary(dummy)
return, img
end
dummy = makepup(dim,diam,obs)
img1 = image(dummy,wf1,lambda_psf)
img2 = image(dummy,wf2,lambda_psf)
return, [img1, img2]
end
```

-> modélisation PSF à 500 nm et en bande H à C2PU pour $r_0=10\text{cm} \Leftrightarrow \text{seeing}=1''$
 -> vérification FWHM (fit Gaussienne)
 -> même chose pour $\text{seeing}=2''$ et $\text{seeing}=0.5''$

Images et turbulence

-> Bruits de détection

- Au tout début : bruit de photon (*photon noise*), poissonien, transf° de l'image.
- Tout à la fin : bruit de lecture (*read-out noise, RON*), gaussien de moyenne nulle et d'écart-type σ_e [e-/px], bruit additif.
- Entre les deux : bruit de courant d'obscurité (*dark current noise*), bruit d'amplification (*amplification noise*) et *exotic dark current noise* dans le cas des EMCCD, bruit dû à l'étalonnage (*calibration*) de champ plat (*flat field*), etc.

=> VOIR NOTES...

Imagerie «Speckle»

Par simple TF, on a :

$$\hat{I}(\vec{f}) = \hat{O}(\vec{f}) \hat{S}(\vec{f})$$

Où la TF de S est la fonction de transfert optique (FTO, OTF).

Celle instantannée est aléatoire et à valeurs complexes non-nulles jusqu'à la fréquence de coupure du télescope D/λ , et :

$$|\hat{O}(\vec{f})|^2 = \frac{\langle |\hat{I}(\vec{f})|^2 \rangle}{\langle |\hat{S}(\vec{f})|^2 \rangle}$$

Imagerie «Speckle»

$$|\hat{O}(\vec{f})|^2 = \frac{\langle |\hat{I}(\vec{f})|^2 \rangle}{\langle |\hat{S}(\vec{f})|^2 \rangle}$$

C'est la densité spectrale de puissance (DSP) de l'objet O , un invariant statistique égal à la racine carrée de la fonction de «visibilité» de l'objet O , calculable donc à partir de la DSP des images I et de la DSP d'une estimation de la PSF S , qui va permettre de remonter à l'objet O -- en fait «seulement» à son autocorrélation (AC) [*] => pb d'indétermination de quadrant à cause du carré qui fait perdre la phase (=>rend paire l'AC).

[*] : Théorème de Wiener-Khintchine : $AC(\mathbf{rho}) = \int O(\mathbf{r}) O(\mathbf{r}+\mathbf{rho}) d\mathbf{r} = \text{TF}^{-1}(\text{DSP}(\mathbf{f}))$

=> ILLUSTRATION ÉTOILE DOUBLE...

Imagerie «Speckle»

-> Calcul de la DSP des images d'une étoile simple non-résolue (PSF) et d'une binaire, avec *speckle* puis *speckle et bruits*...

```
function dsp_speckle, image, rho
;
; Calcul des densites spectrales de l'etoile de reference (image)
; et d'une etoile double de separation rho (en x seulement)
;
; image : speckles de l'etoile de reference
; rho : separation binaire [px]
; use:
; rho = 10L
; dsp = dsp_speckle(image, rho)
;
; Marcel Carbillet (marcel.carbillet@unice.fr), 21 Feb. 2014
; Last modification : Feb. 2014
;
dim=(size(image))[2]

dsp_sp=(abs(fft(image[0:dim-1,*])))^2
dsp_sp+=(abs(fft(image[dim:2*dim-1,*])))^2
dsp_sp/=2.
dsp_sp=shift(dsp_sp, dim/2, dim/2)

double=image+shift(image, rho, 0)
dsp_db=(abs(fft(double[0:dim-1,*])))^2
dsp_db+=(abs(fft(double[dim:2*dim-1,*])))^2
dsp_db/=2.
dsp_db=shift(dsp_db, dim/2, dim/2)

return, [dsp_sp, dsp_db]
end
```


Imagerie «Speckle»

-> Manip' *speckle*/étoile double...

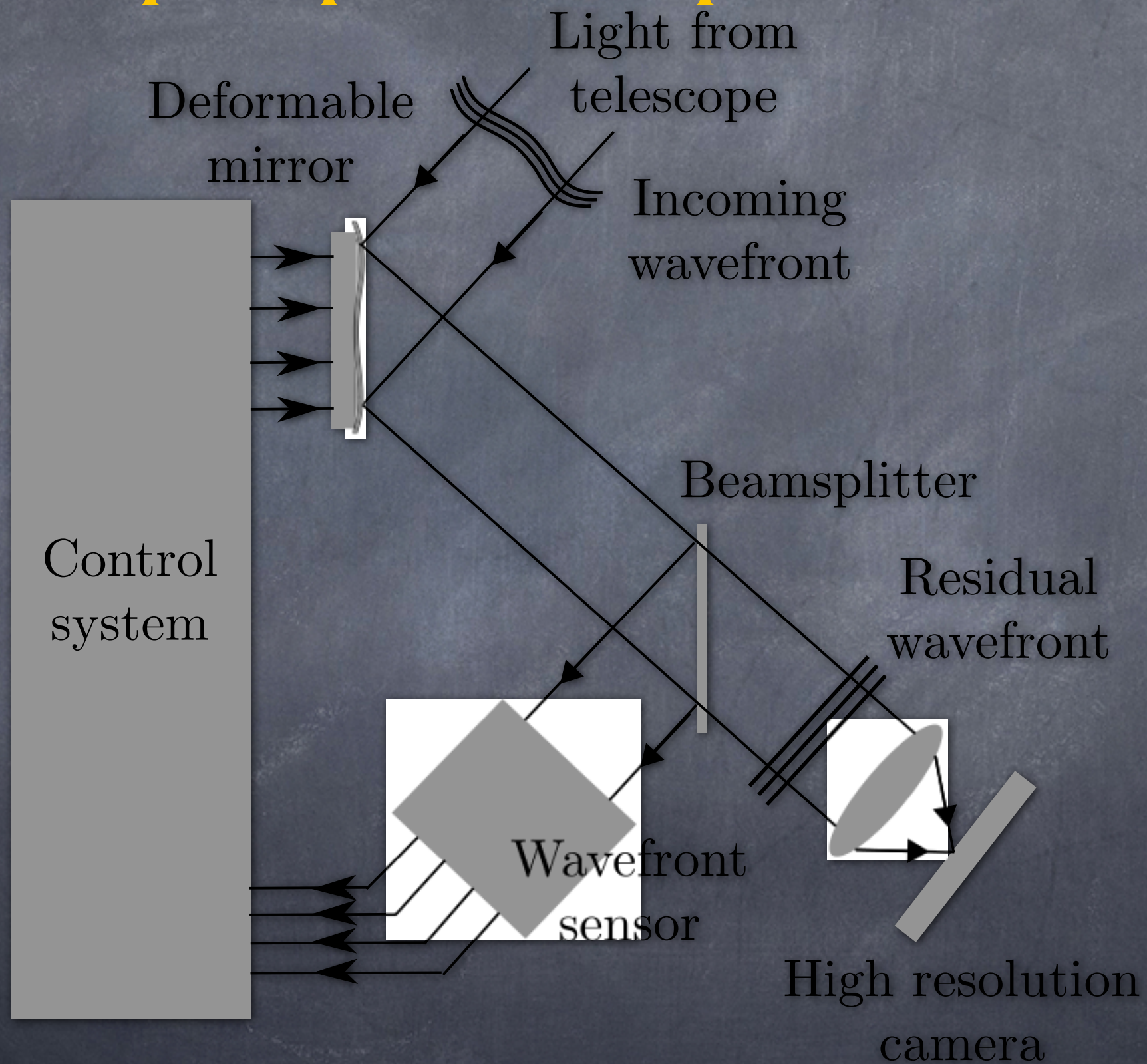


Optique adaptative

Quelques ordres de grandeurs concernant les systèmes d'OA :

	@500nm	@2.2 μ m
échantillonnage spatial → $d \simeq r_0$	10 cm	60 cm
nombre d'éléments d'analyse (et de correction) → $N \propto (D/d)^2$, avec $D=10\text{m}$	7500	200
échantillonnage temporel → $f \propto 10 v/r_0$	1 kHz	0.2 kHz

Optique adaptative



Optique adaptative

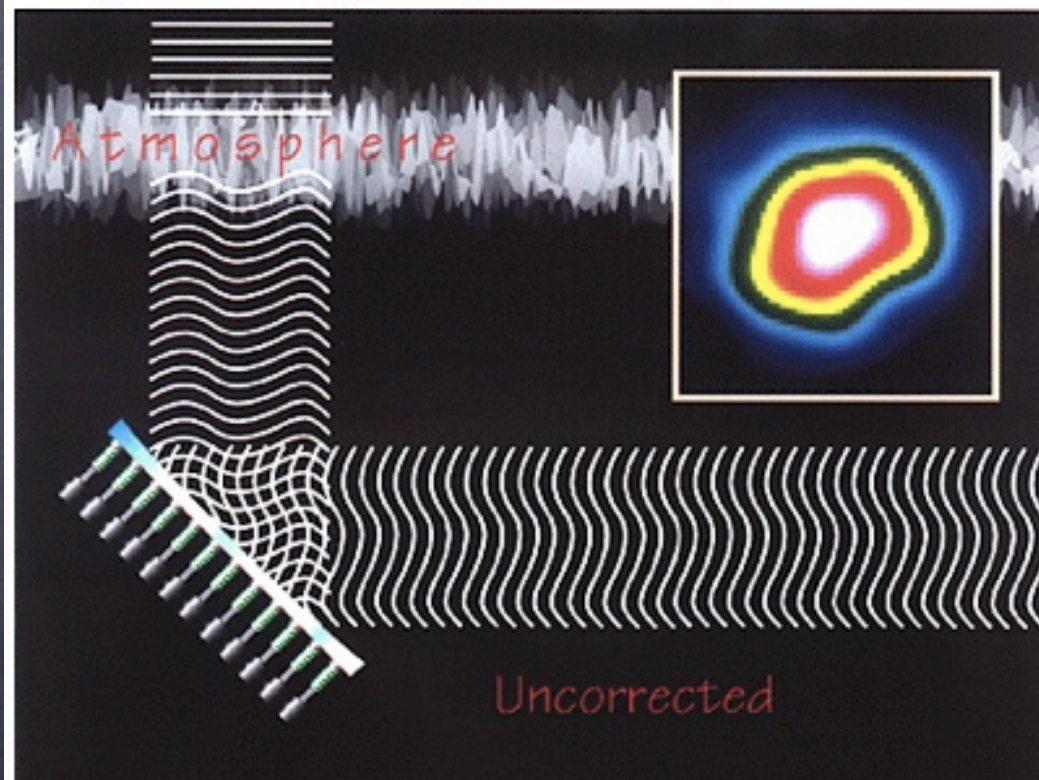
Introduction to Adaptive Optics

Credits: ESO and Jennifer Lotz

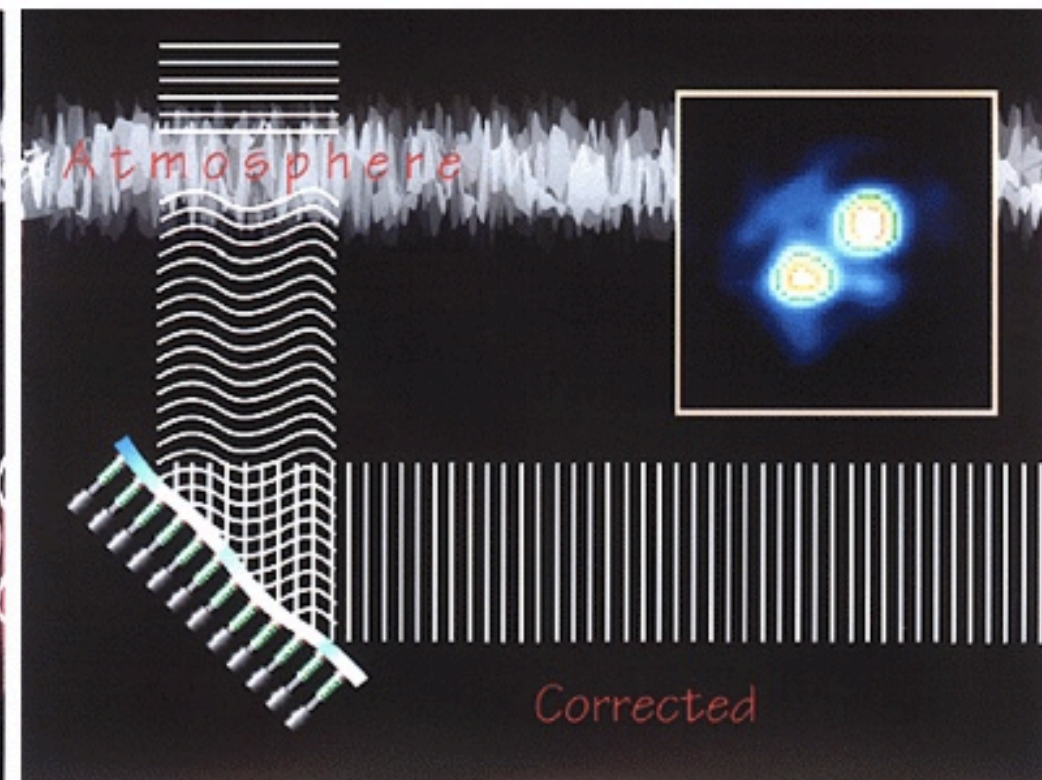
As astronomers attempt to understand the limits of the physical universe, they must look deep into the night sky with a sharp eye. Unfortunately, looking into the night sky is like looking up from the bottom of a swimming pool. Turbulence in the upper atmosphere causes spatial and temporal anomalies in atmosphere's refractive index and any planar wavefront of light passing through this turbulence will experience phase distortions by the time it reaches a ground-based telescope. These phase distortions blur the images obtained by the telescope and result in resolution an order of magnitude worse than the theoretical capabilities of the telescope. The power of ground-based telescopes to observe and resolve distant faint astronomical objects is limited by the effects of the atmosphere on the light coming from these objects.

The desire to avoid the image degradation due to the atmosphere was one of the main motivations behind the MPA ALFA Project.

In recent years, astronomers have developed the technique of adaptive optics to actively sense and correct wavefront distortions at the telescope during observations. A telescope with adaptive optics measures the wavefront distortions with a [wavefront sensor](#) and then applies phase corrections with a deformable mirror on a time scale comparable to the temporal variations of the atmosphere's index of refraction. Adaptive optics dramatically improves image resolution as shown in the AO principle drawings below.



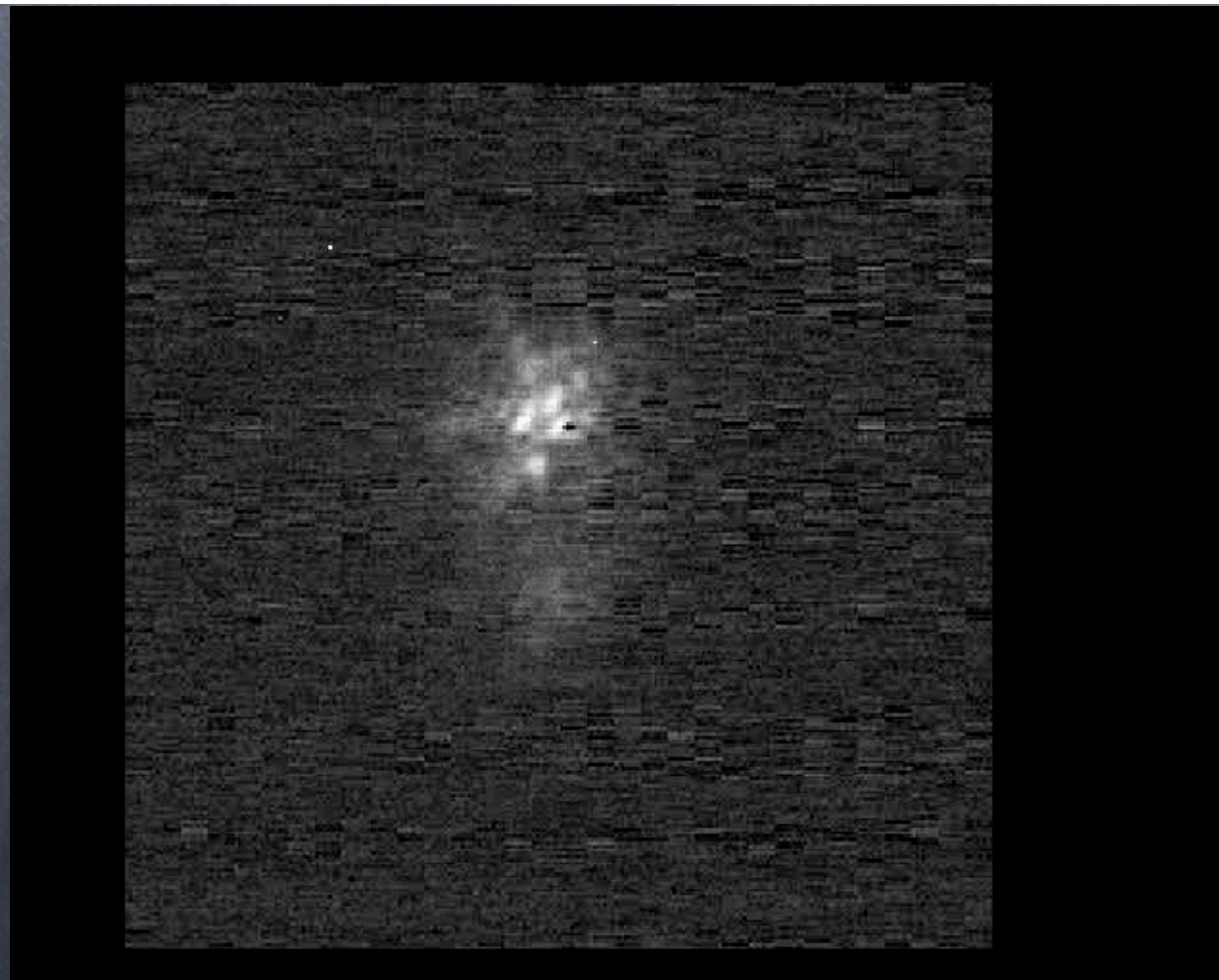
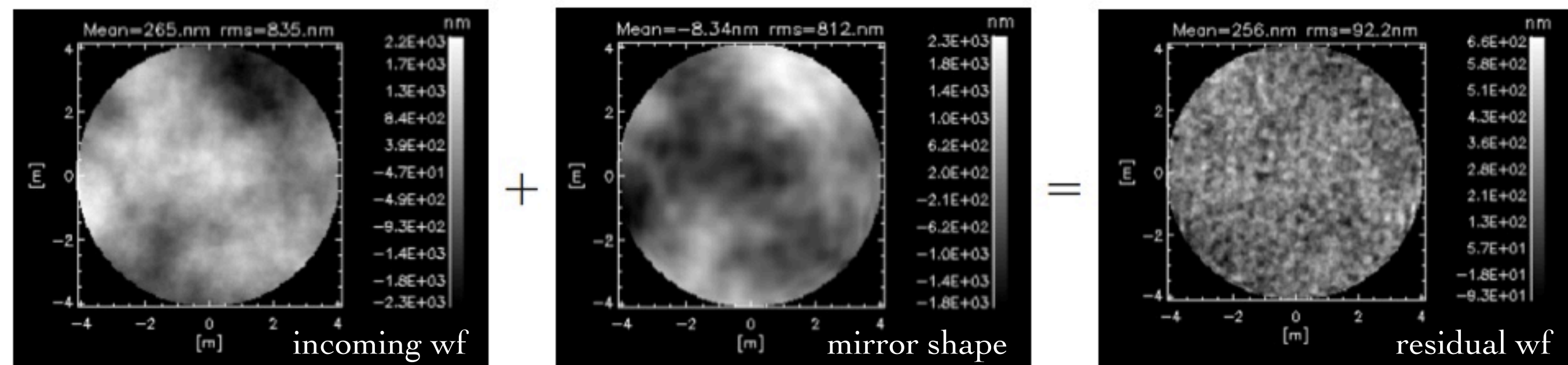
Blurred, uncorrected image (without Adaptive Optics)



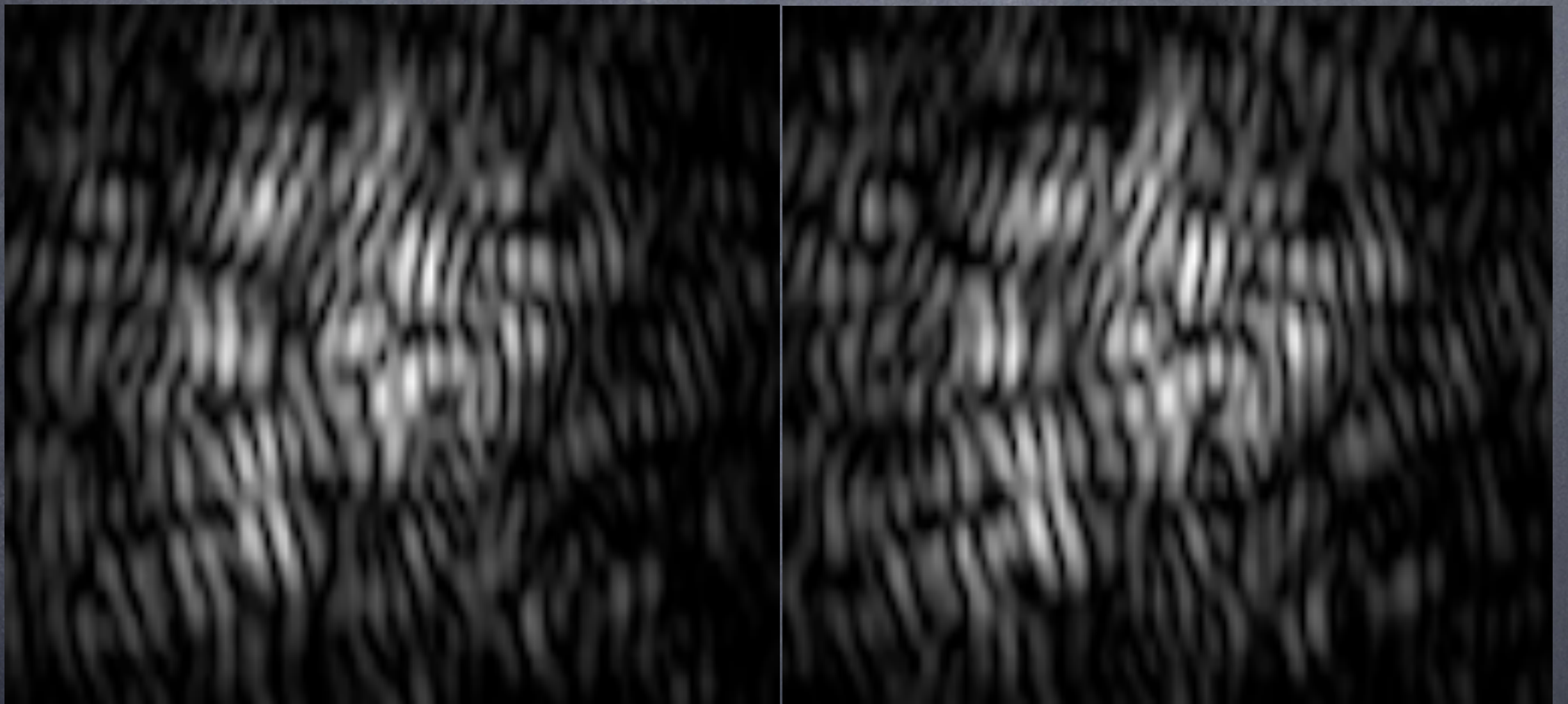
With Adaptive Optics corrected image

For more information see Adaptive Optics Tutorial in [german](#) or [english](#) by Stefan Hippler and Andrei Tokovinin.

Optique adaptative



Optique adaptative



Optique adaptative

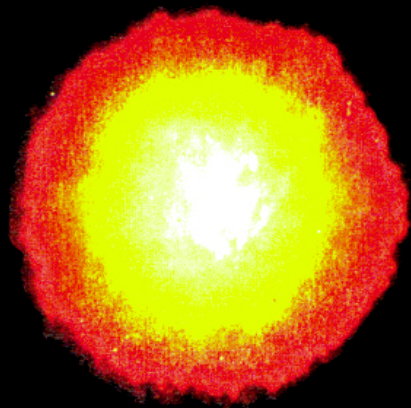


Image pose longue

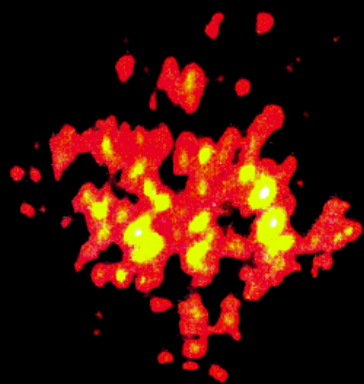


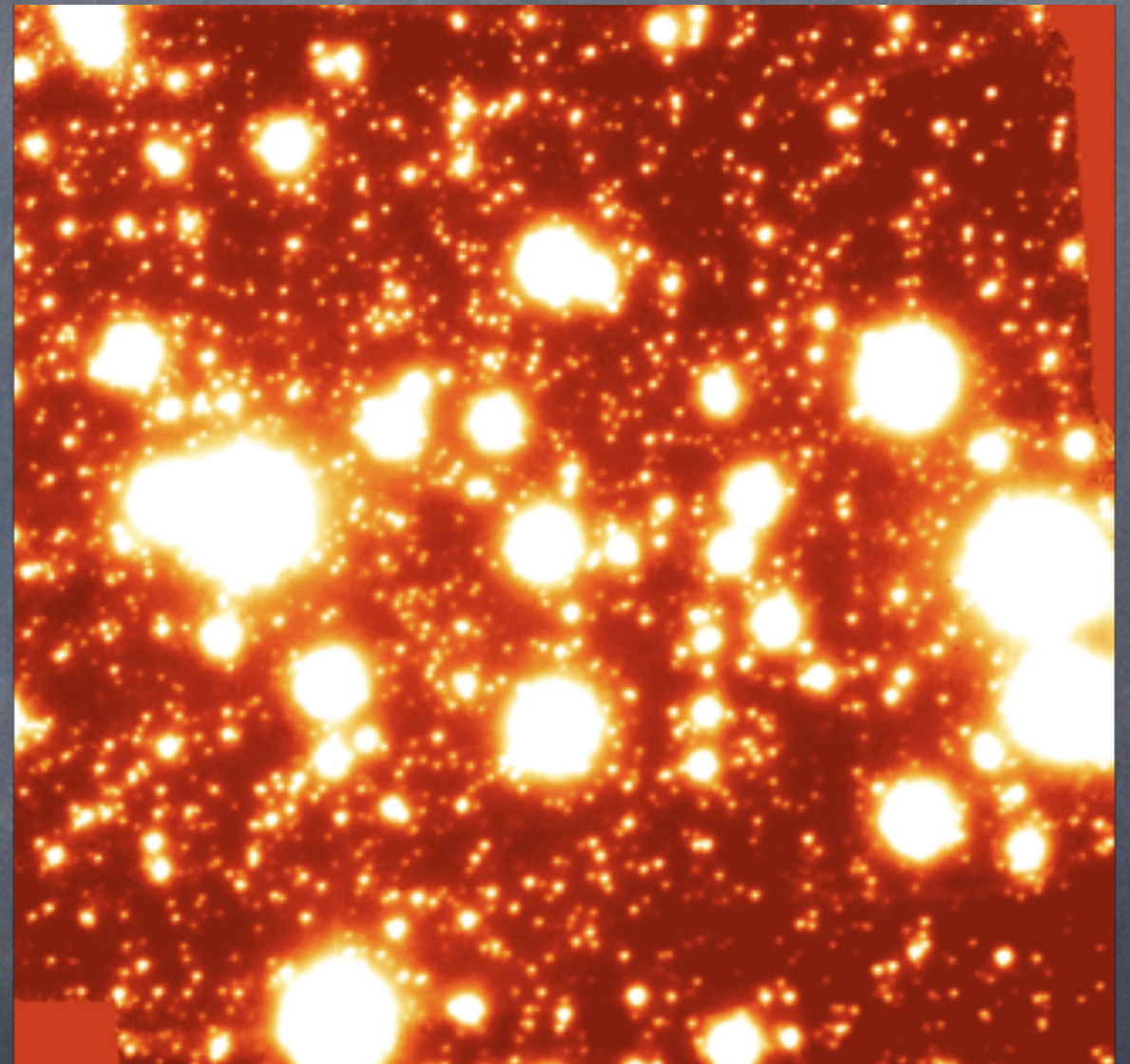
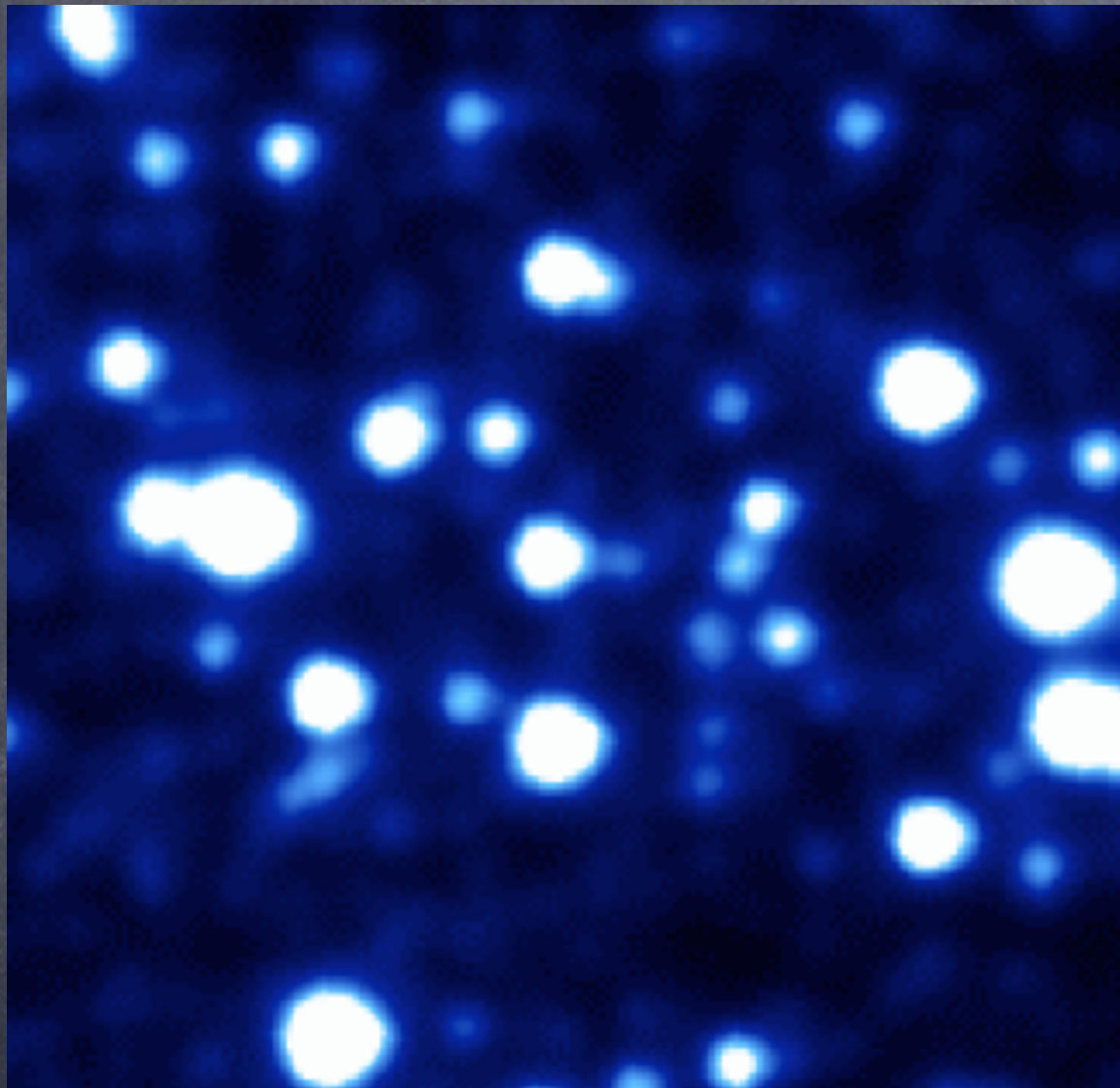
Image pose courte



Image avec OA

(Lick Observatory, télescope de 1m, à gauche : 1", à droite : $\sim \lambda/D$)

Optique adaptative



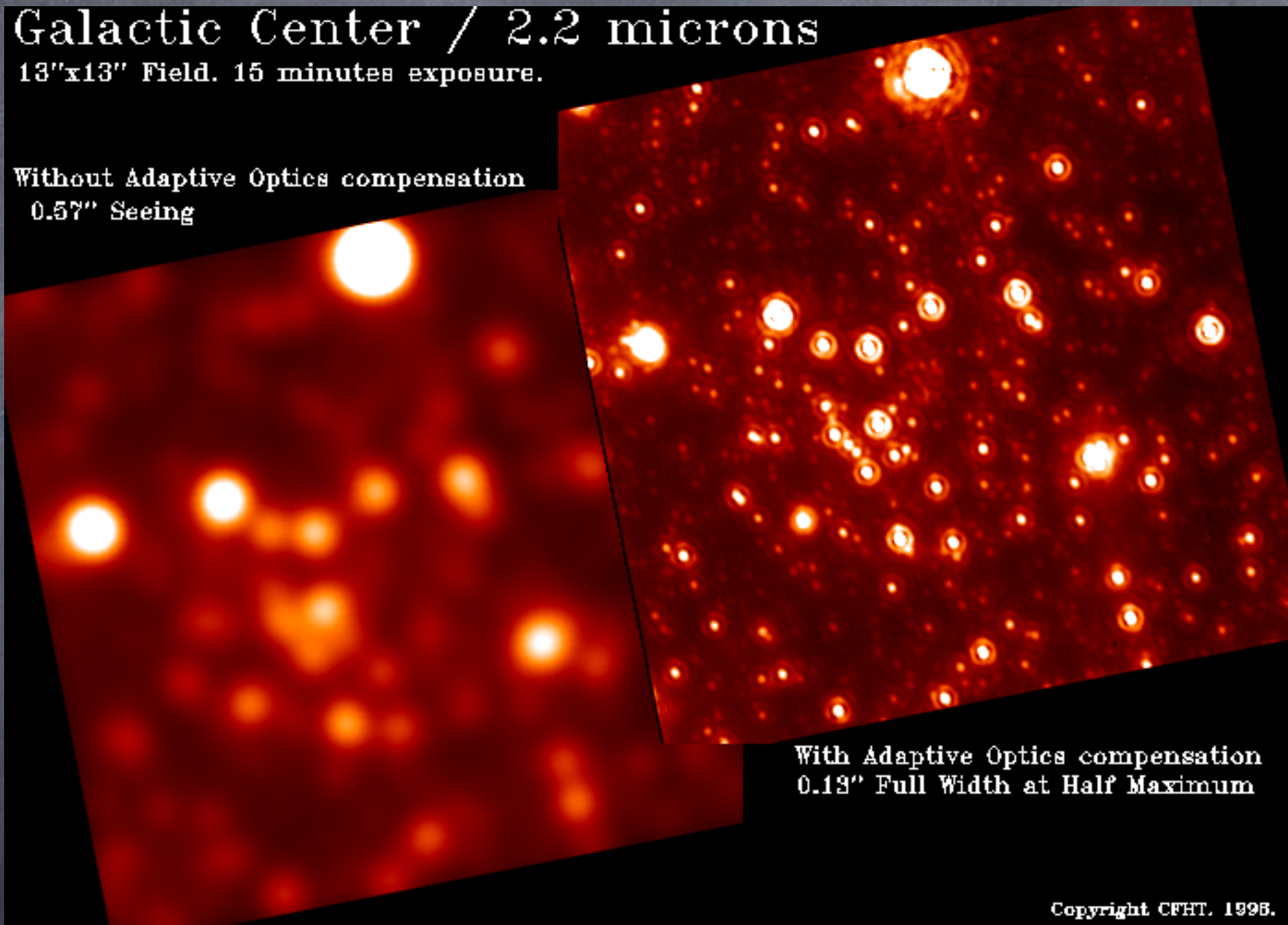
(Gemini Observatory, Hokupa'a+Quirc, à gauche : $0''85$, à droite : $0''092$)

Optique adaptative

Galactic Center / 2.2 microns

13"x13" Field. 15 minutes exposure.

Without Adaptive Optics compensation
0.57" Seeing

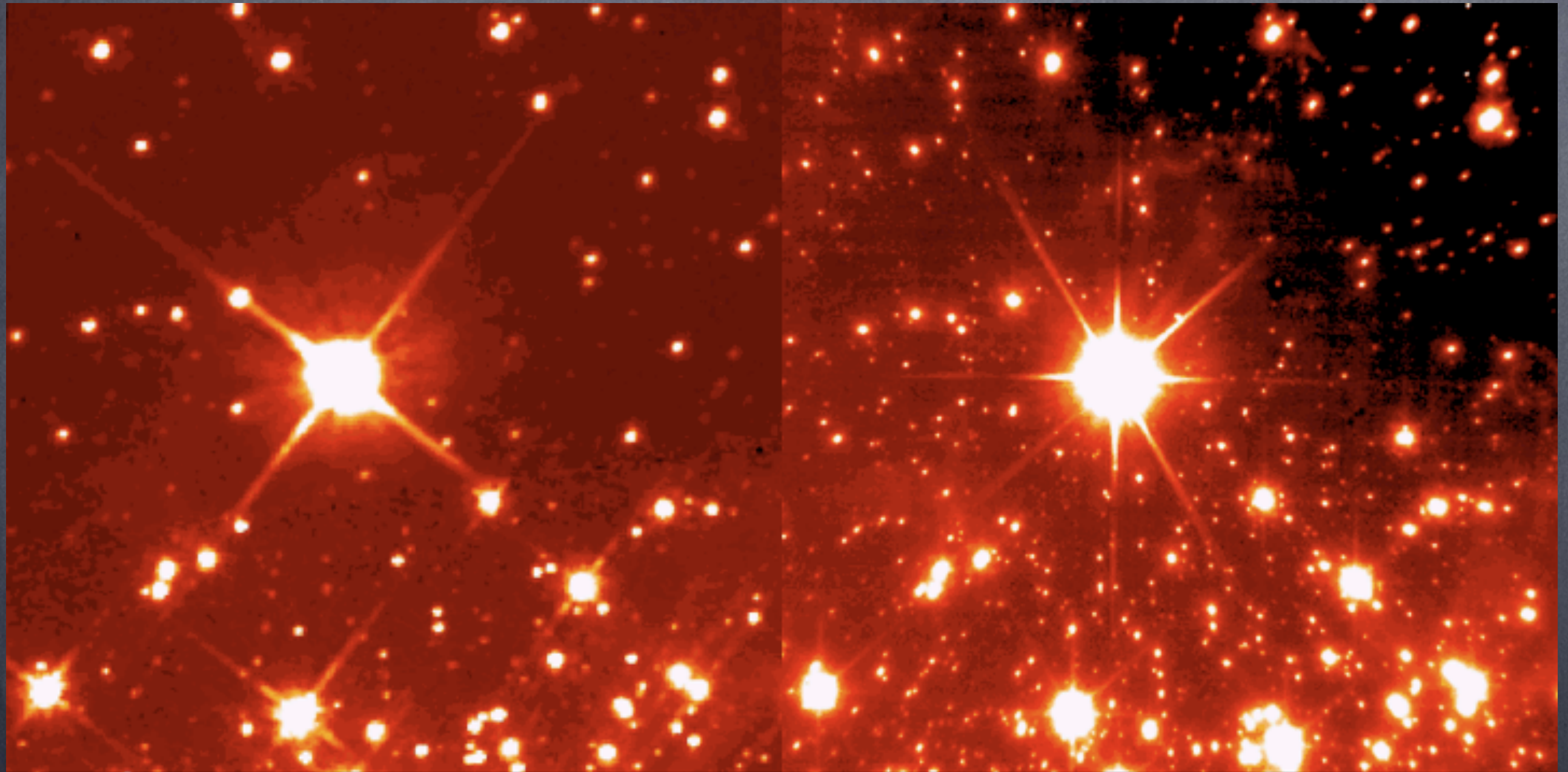


With Adaptive Optics compensation
0.19" Full Width at Half Maximum

Copyright CFHT, 1996.

(Canada-France-Hawaii Telescope, images longue pose (15'))

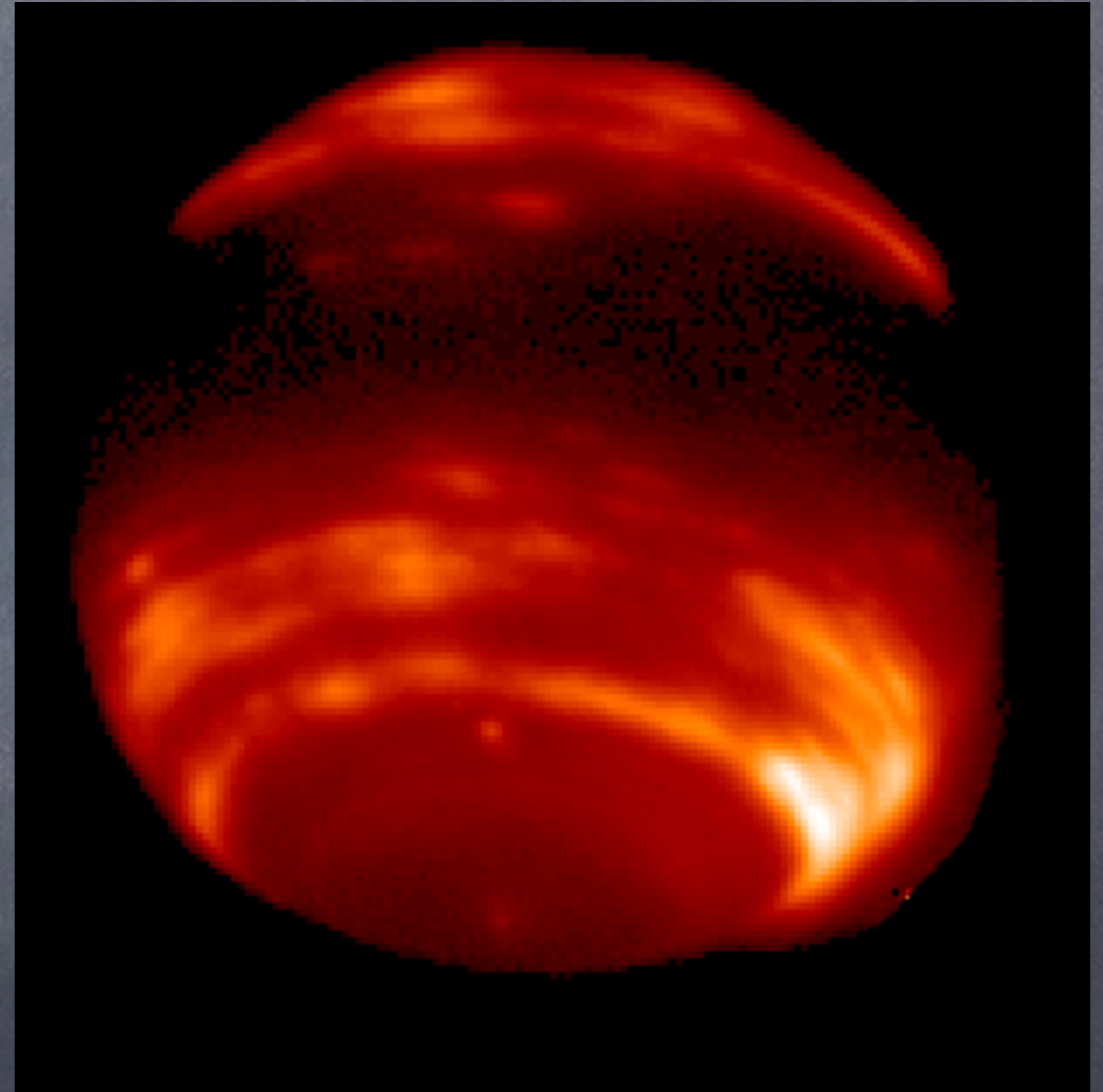
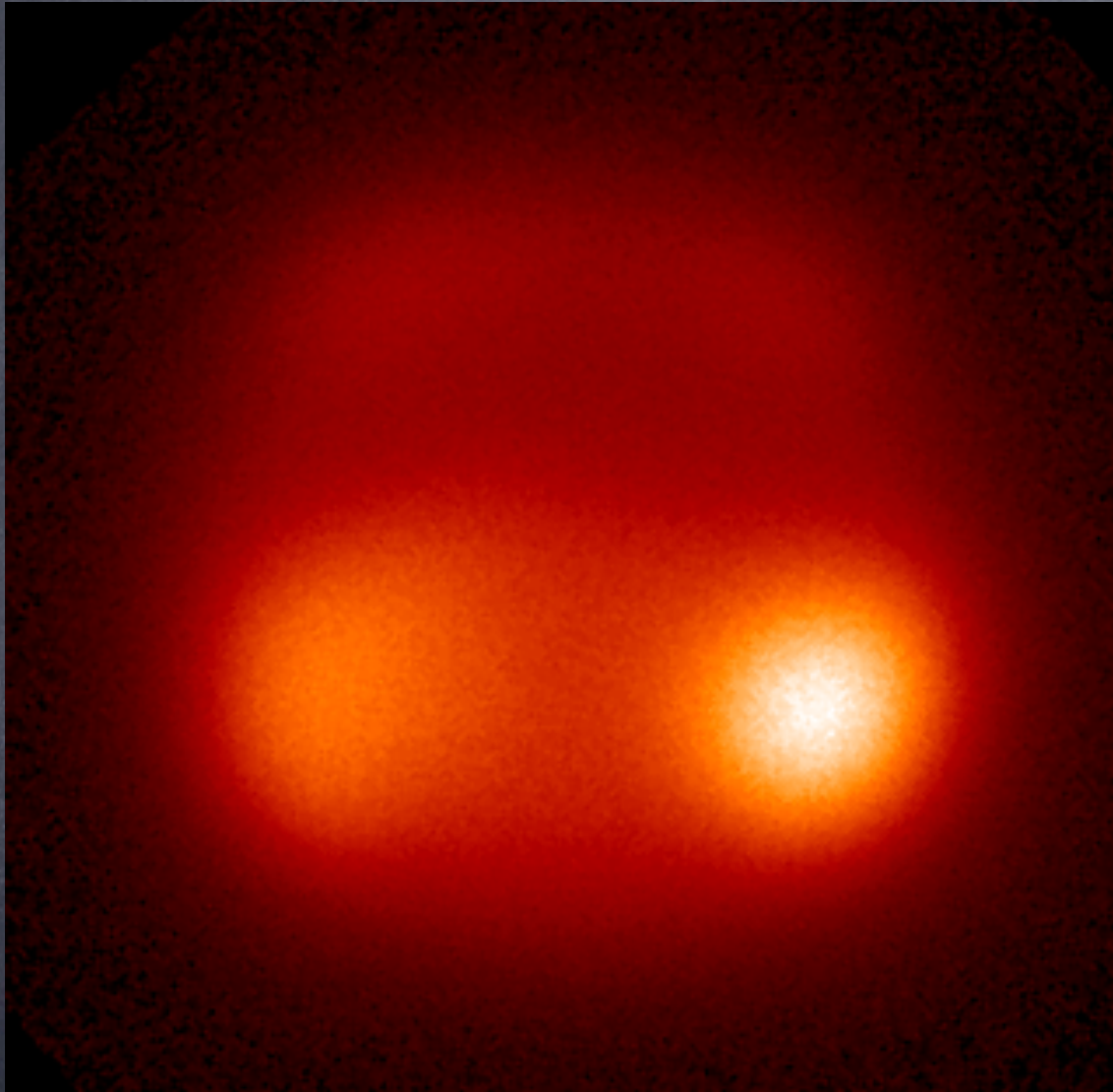
Optique adaptative



HST - WFPC2 (I-band)

VLT YEPUN - NAOS - CONICA (K-band)

Optique adaptative



(Neptune à 1.65 microns, Keck Observatory, mai et juin 1999)

Optique adaptative



NACO Image of the Brown Dwarf Object 2M1207 and GPCC

Un objectif actuel : la détection et caractérisation d'exoplanètes...

Rapports d'intensité très importants > coronographie + OA extrême (XAO)

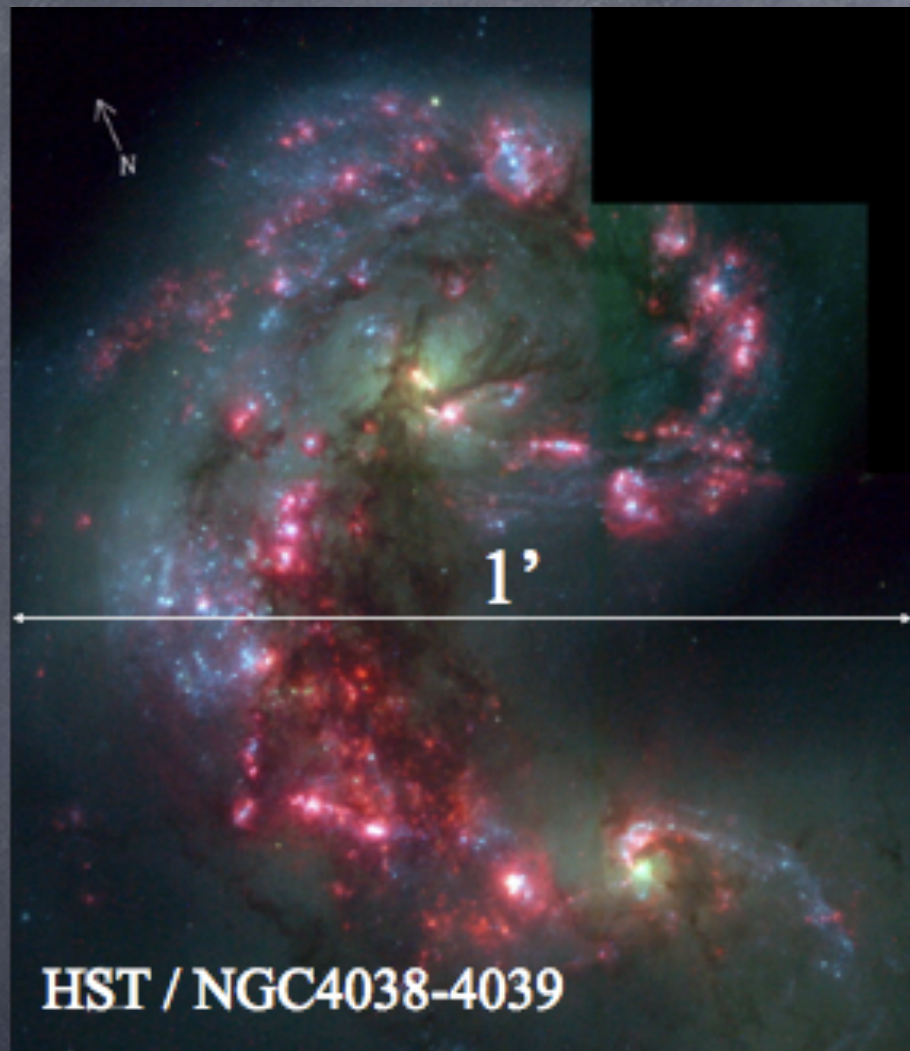
XAO utile aussi pour l'observation d'autres types d'objets faibles (près d'objets brillants) : matière circumstellaire, (disque, jets), noyaux actifs de galaxies, quasars, etc.

(Chauvin et al., A&A, 2004 et 2005)

(Naine brune à 70pc, étoile jeune < 10 millions d'années, séparation ~ 0"8, rapport d'int.~100, $M_{\text{étoile}} \sim 20 M_{\text{Jupiter}}$, $M_{\text{planète}} \sim 5 M_{\text{Jupiter}}$)

Optique adaptative

Un autre objectif actuel : l'imagerie grand champs...



- évolution de la fonction de masse des étoiles dans la voie lactée
- évolution de la formation stellaire dans les galaxies proches
- histoire des galaxies lointaines

Optique adaptative

Zoologie (non-exhaustive) des systèmes d'OA :

- Observer à haute résolution angulaire (HRA) des objets génériques : OA classique
- Avoir en plus une couverture du ciel à 100% : OA à étoile laser artificielle (ELA/LGS)
- Avoir un grand champ : OA multi-références (GLAO) et multi-conjuguée (MCAO/OAMC), mais aussi : MOAO/OAMO.
- Observer aussi à THD : OA extrême (XAO/OAX)

Budget d'erreur post-OA

Erreur globale (variance sur la phase corrigée)

$$\sigma_{post-OA}^2 = \sigma_{atm.}^2 + \sigma_{sys.OA}^2 + \sigma_{autres}^2$$

- Terme d'erreur dû à l'atmosphère turbulente seule
- Terme d'erreur dû aux résidus du système d'OA lui-même
- Autres termes d'erreur...

Budget d'erreur post-OA

Autres termes d'erreur d'origine instrumentale

$$\sigma_{autres}^2 = \sigma_{calib.}^2 + \sigma_{aberr.}^2 + \dots$$

- erreur de calibration du système d'OA
- erreur due aux aberrations non-vues (non-common path aberrations)
- etc.

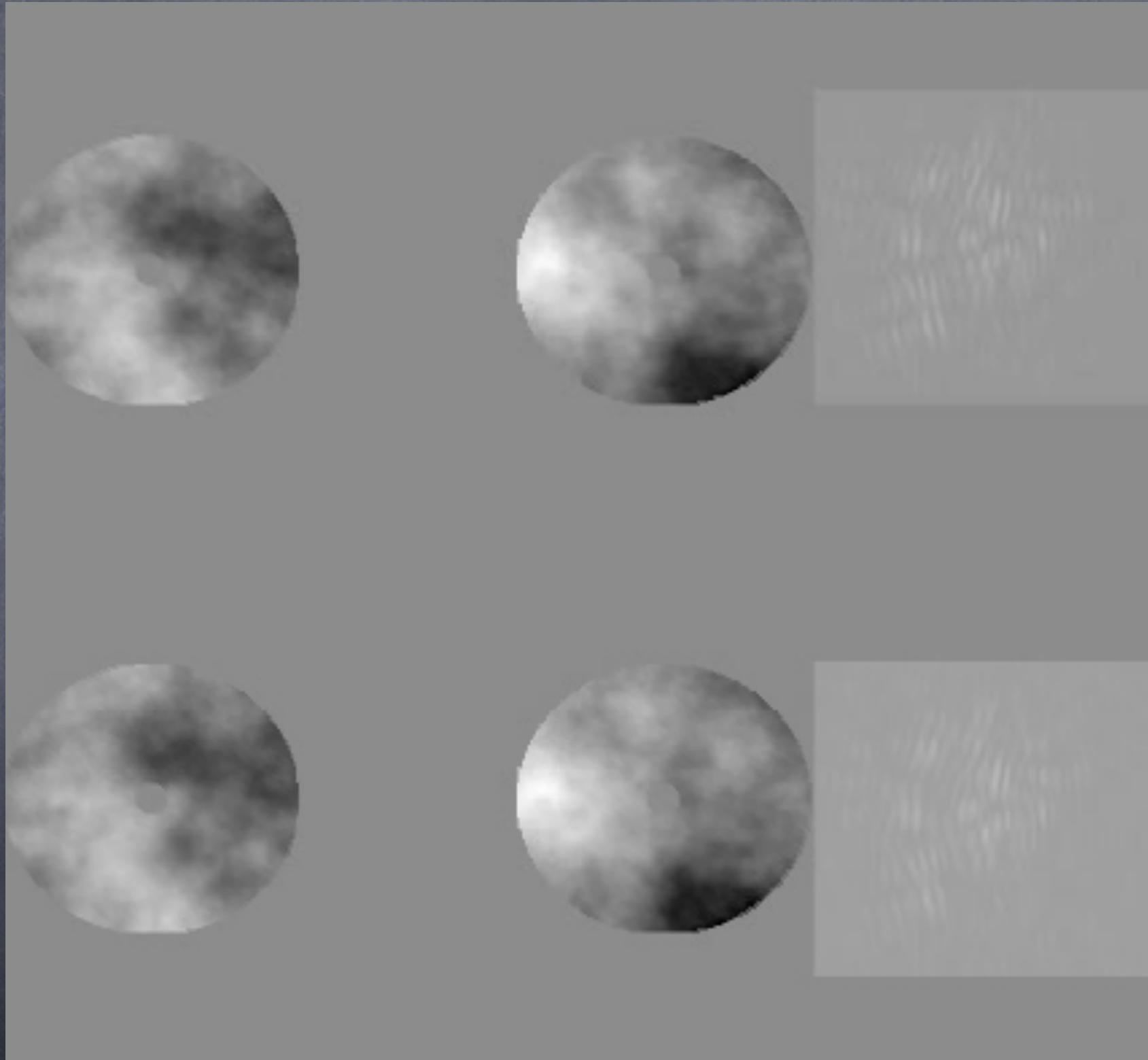
Budget d'erreur post-OA

Terme d'erreur dû à l'atmosphère turbulente seule

$$\sigma_{atm.}^2 = \sigma_{scint.}^2 + \sigma_{diff.}^2 + \sigma_{chrom.}^2 + \sigma_{aniso.}^2$$

- erreur due à la scintillation
- effets diffractifs
- erreur due à la réfraction différentielle
- erreur d'anisoplanétisme

Budget d'erreur post-OA



Budget d'erreur post-OA

Terme d'erreur dû au système d'OA lui-même

$$\sigma_{sys.OA}^2 = \sigma_{fit.}^2 + \sigma_{alias.}^2 + \sigma_{temp.}^2 + \sigma_{mes.}^2 + \sigma_{ELA}^2 + \sigma_{OAMC}^2$$

- erreur de sous-échantillonnage spatial (fitting)
- erreur de repliement (aliasing)
- erreur temporelle (bande passante finie)
- erreur due au bruit de mesure (bruit de photon, bruit de lecture, etc.)
- erreurs spécifiques à l'étoile laser artificielle (ELA)
- erreurs spécifiques à l'OA multi-conjuguée (OAMC)

(Qualité de correction ?...)

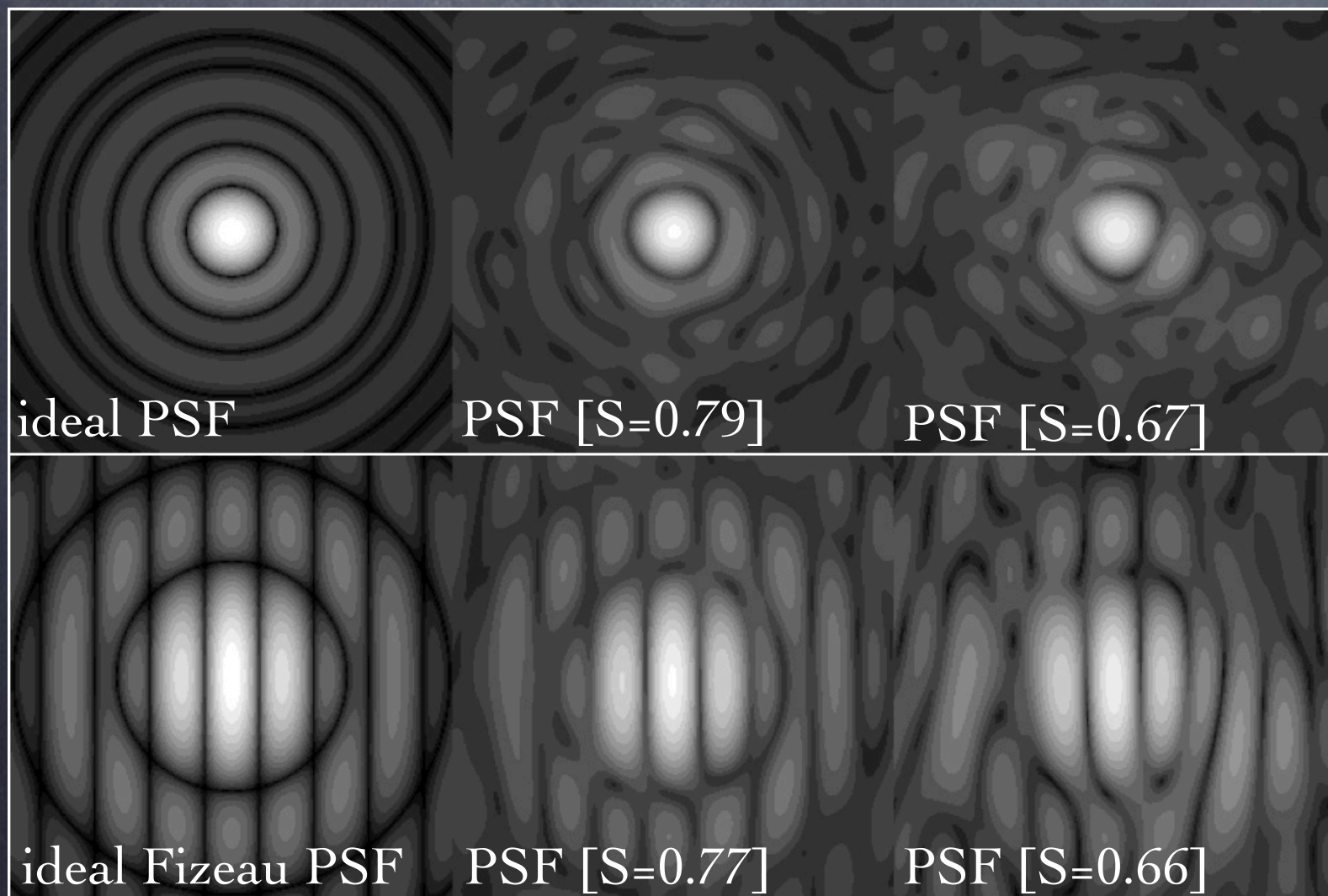
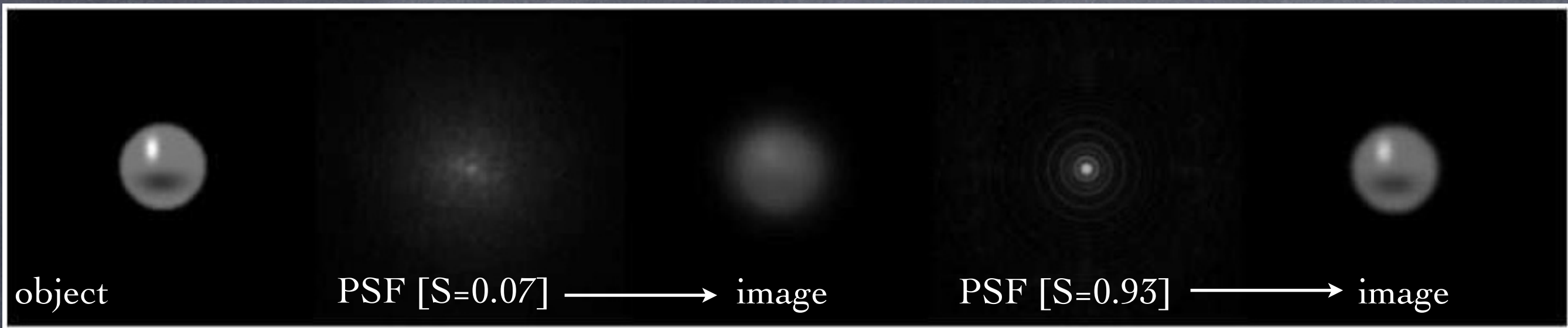
- Notion de rapport de Strehl :

$$S = \frac{I_{\text{post-OA}}[0, 0]}{I_{\text{cas parfait}}[0, 0]}$$

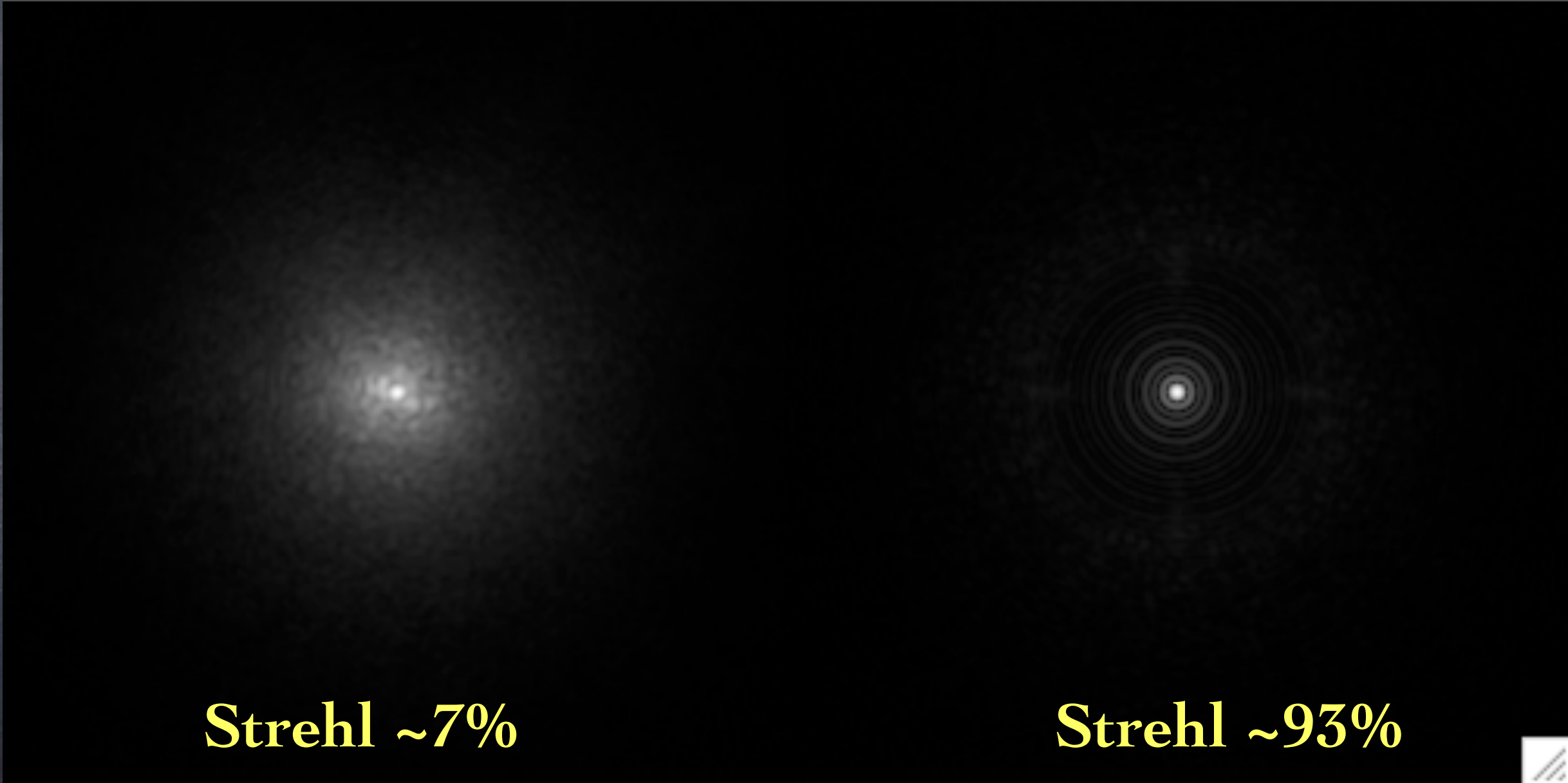
où $I[0,0]$ est l'intensité de la « réponse impulsionnelle » (RI, ou fonction d'étalement du point, FEP, ou « point spread function », PSF) au centre de l'image

(Strehl, K., 1902, Zeit. Instrumentkde, 22, 213)

(Qualité de correction ?...)



(Qualité de correction ?...)



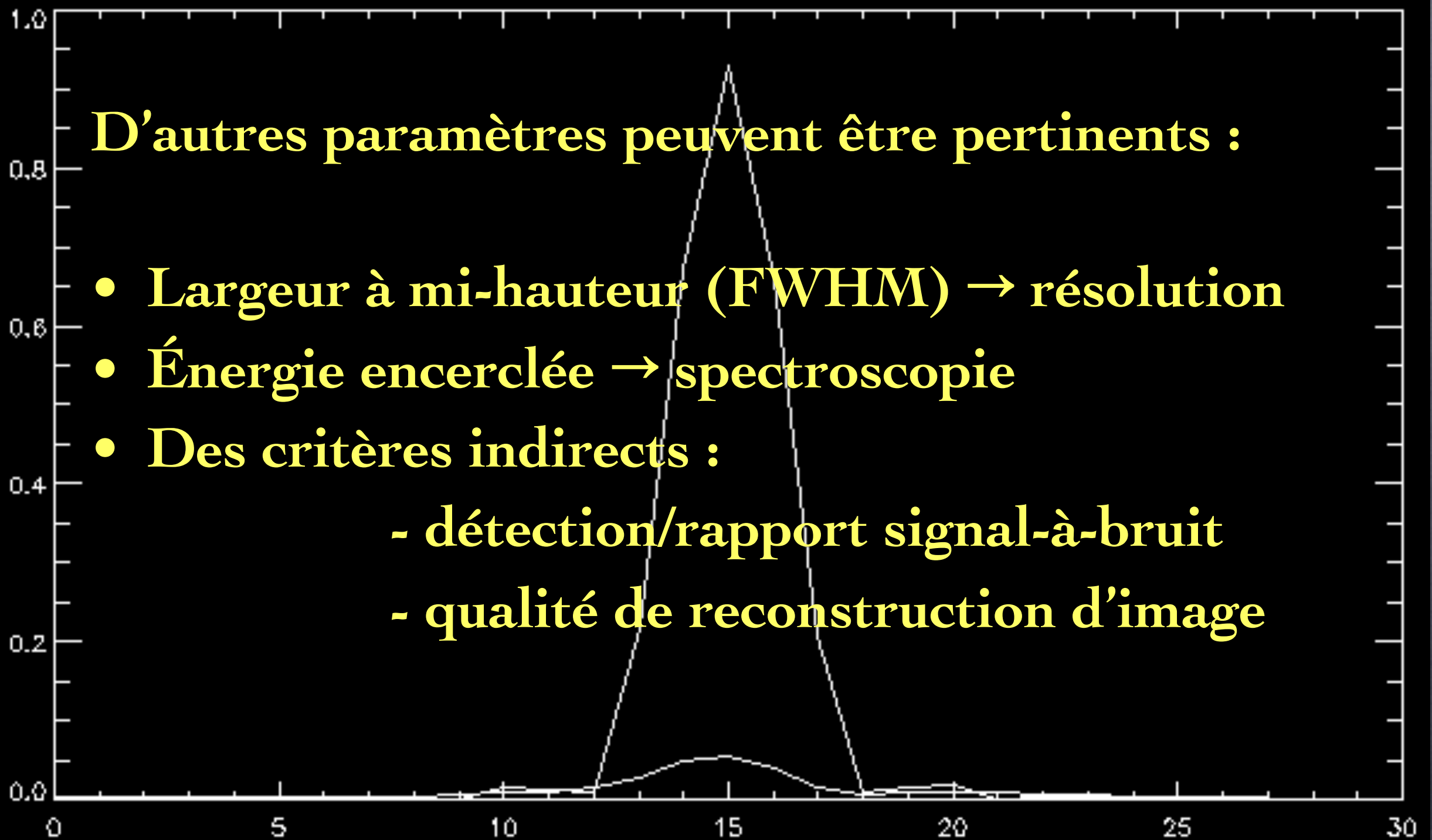
Strehl $\sim 7\%$

Strehl $\sim 93\%$

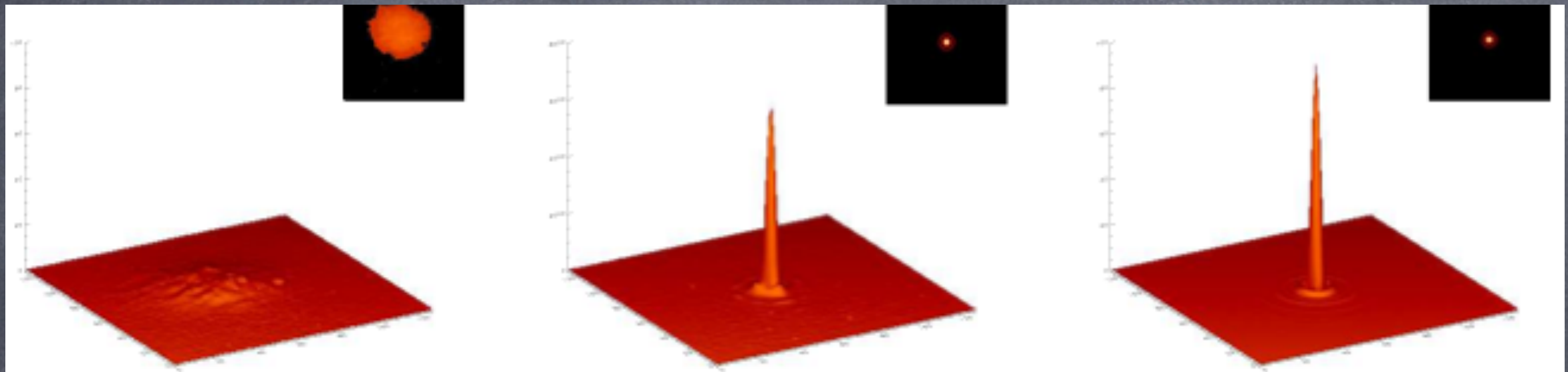
(Qualité de correction ?...)

D'autres paramètres peuvent être pertinents :

- **Largeur à mi-hauteur (FWHM) → résolution**
- **Énergie encerclée → spectroscopie**
- **Des critères indirects :**
 - **détection/rapport signal-à-bruit**
 - **qualité de reconstruction d'image**



Morphologie de la PSF



no correction

corrected ($SR = 64\%$)

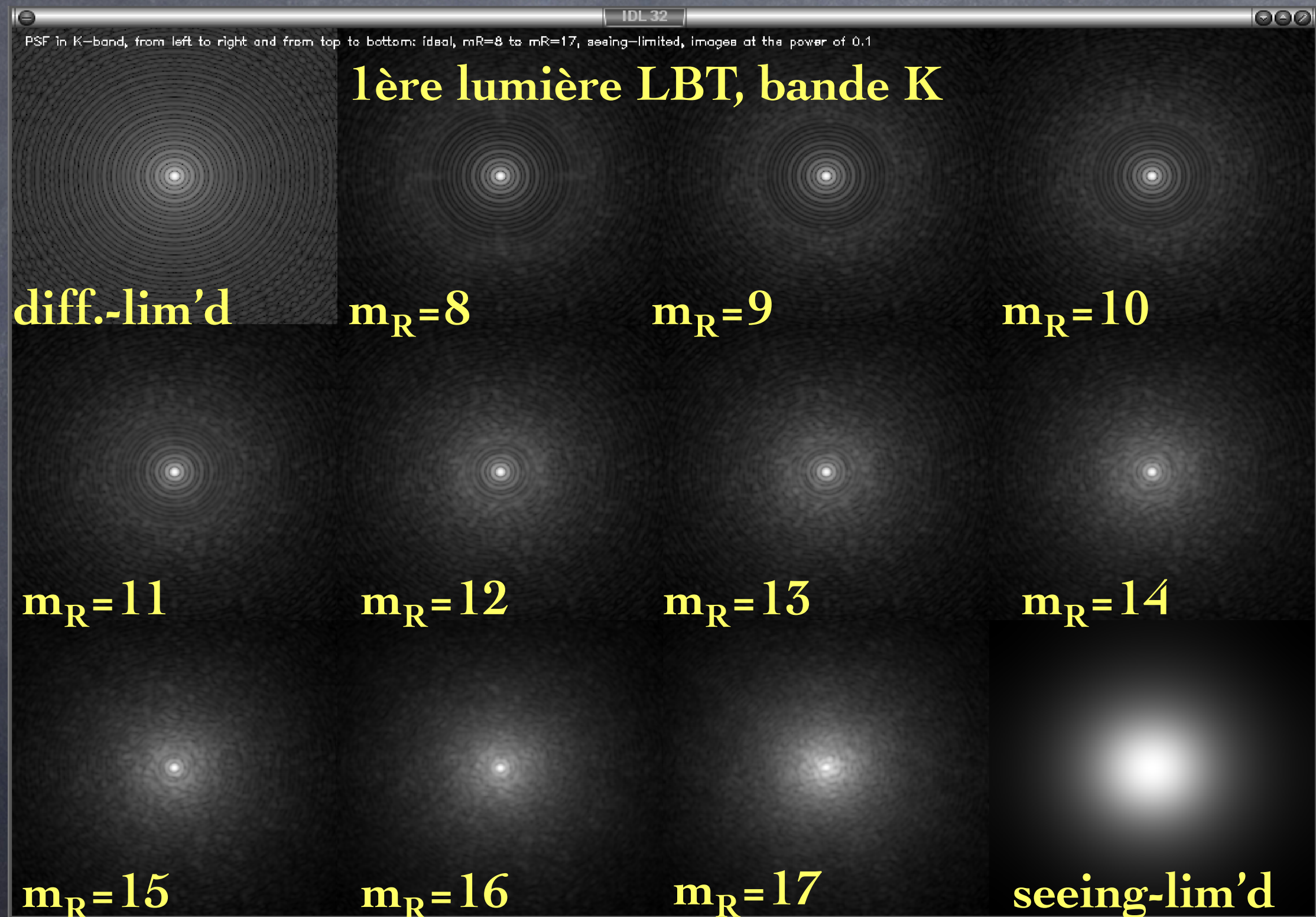
Airy pattern

Imaging wavelength : $2.2\mu m$

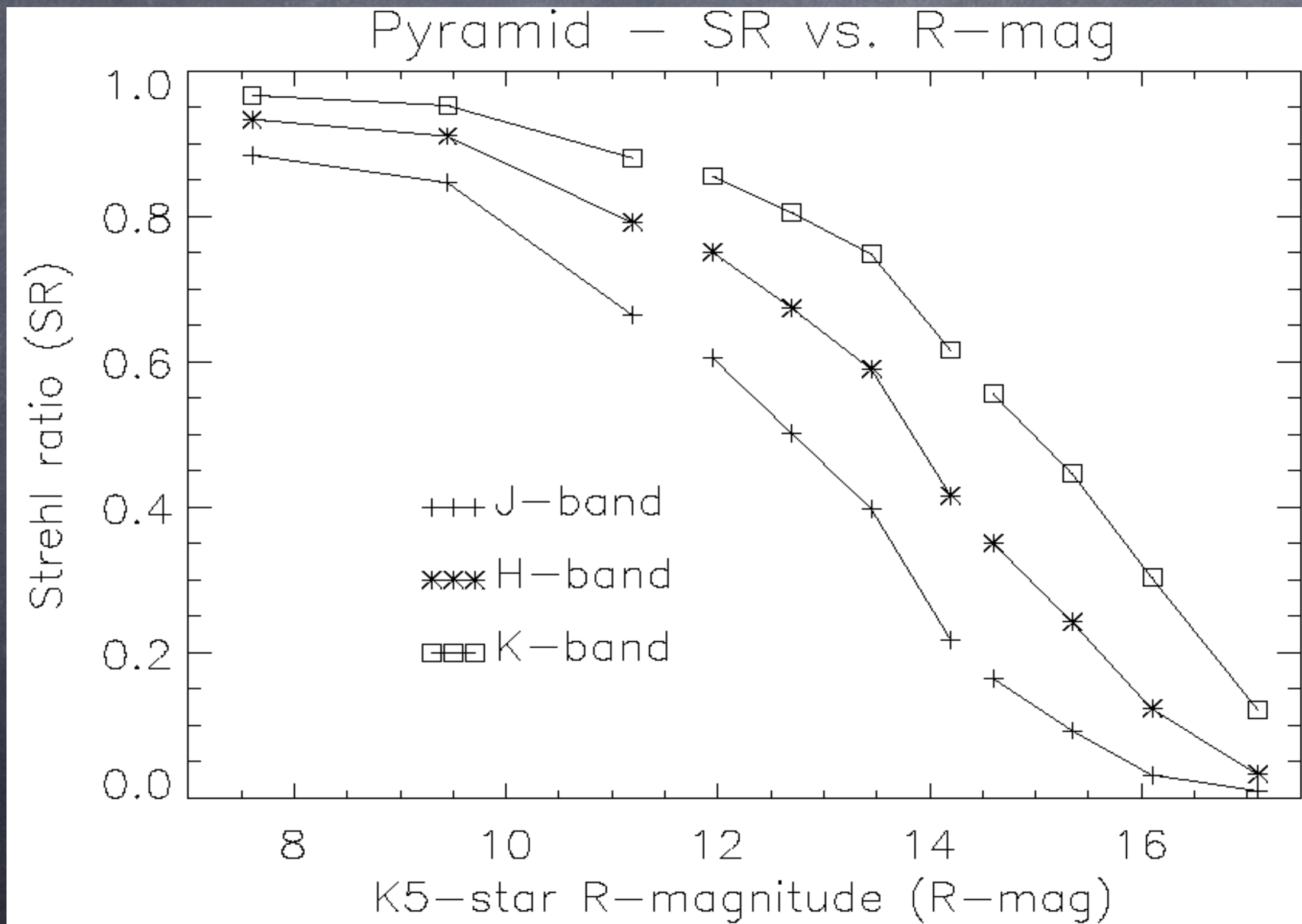
Turbulence : $r_o = 1m$ à $2.2\mu m$, wind speed = $10m/s$, telescope : $D = 8m$

System (NAOS) : 144 sub-aperture, 185 actuators, $500Hz$ temporal sampling frequency

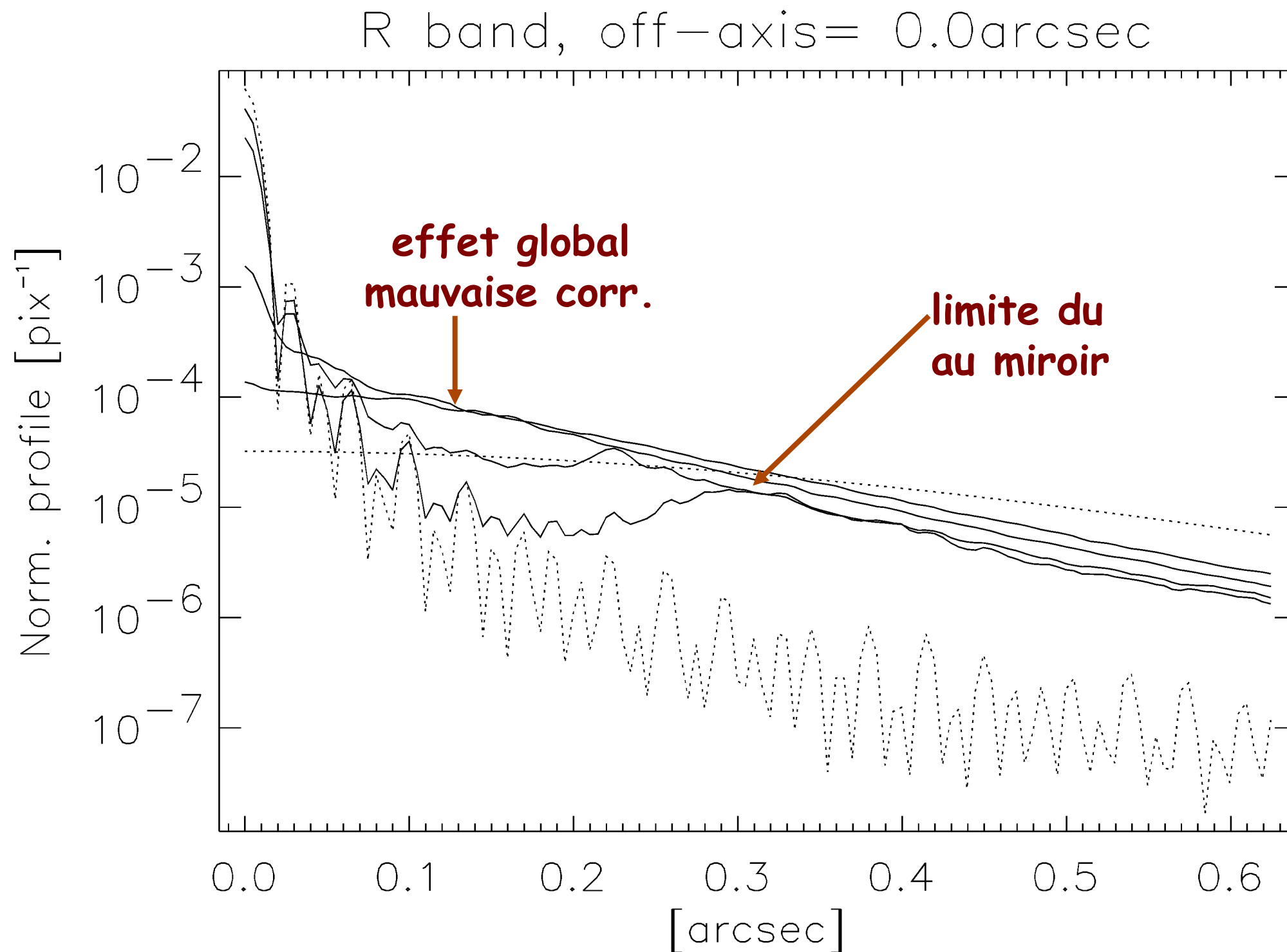
Morphologie de la PSF



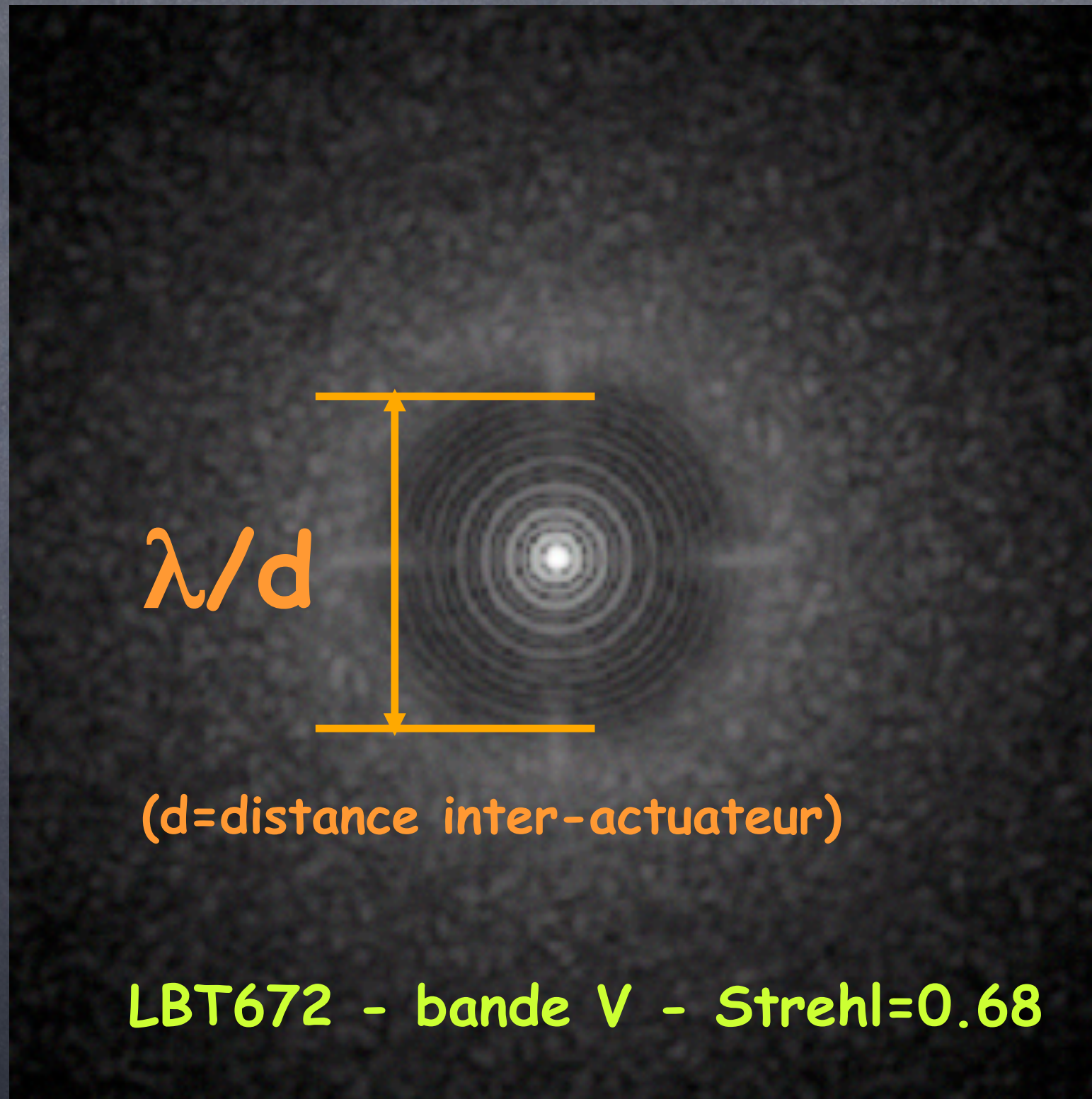
Morphologie de la PSF



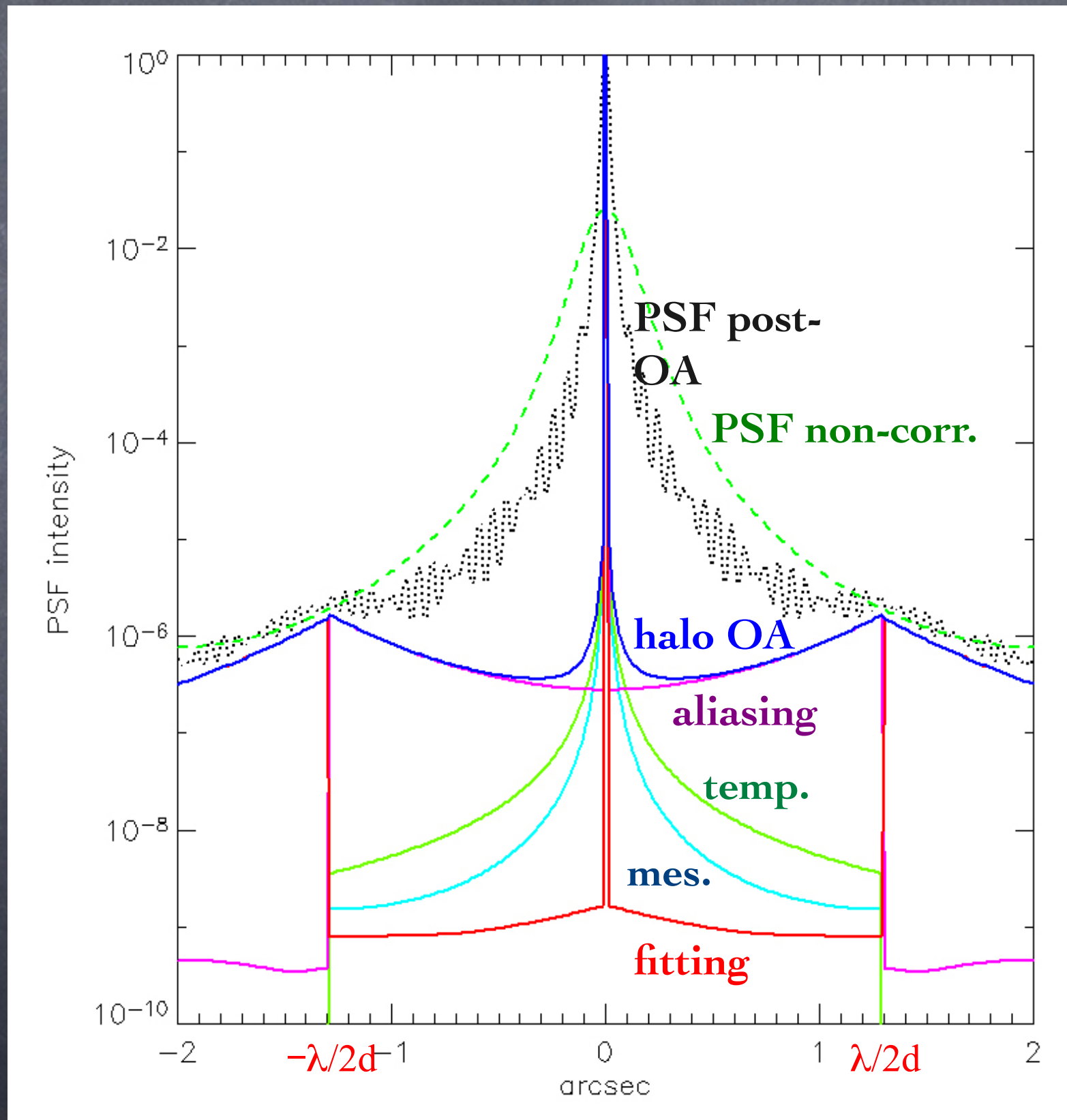
Morphologie de la PSF



Morphologie de la PSF



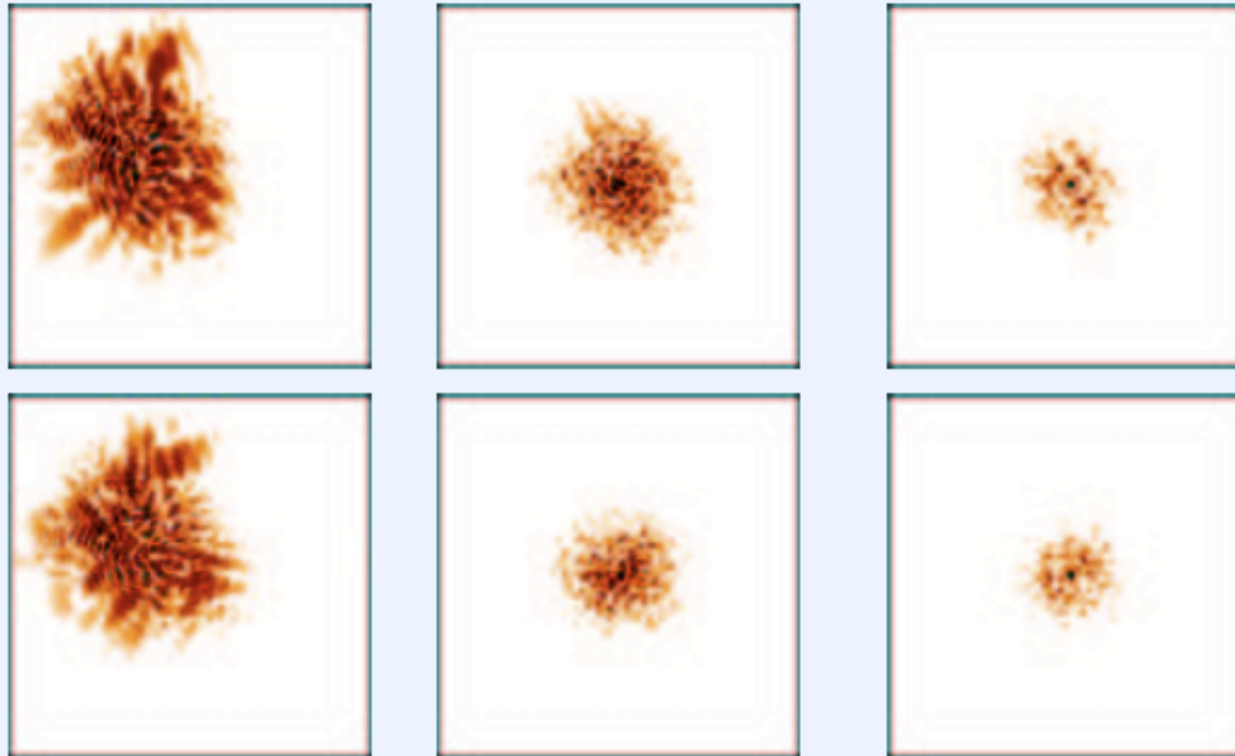
Morphologie de la PSF



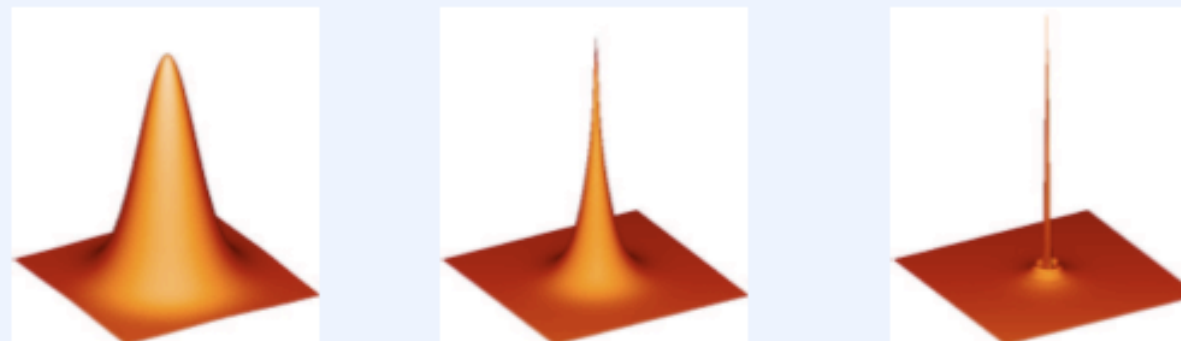
Morphologie de la PSF

sans correction faible correction correction partielle

images courte pose [échelle log]



images longue pose (normalisées)

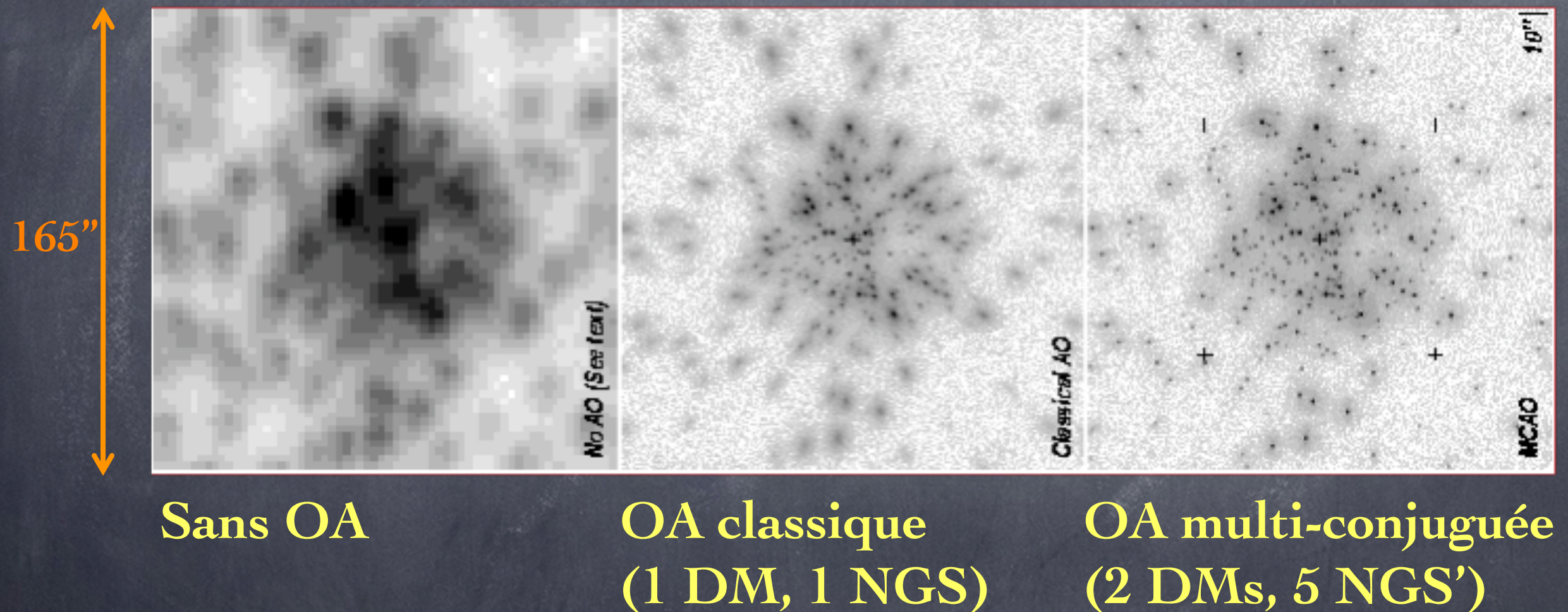


Réduction du nombre de speckle

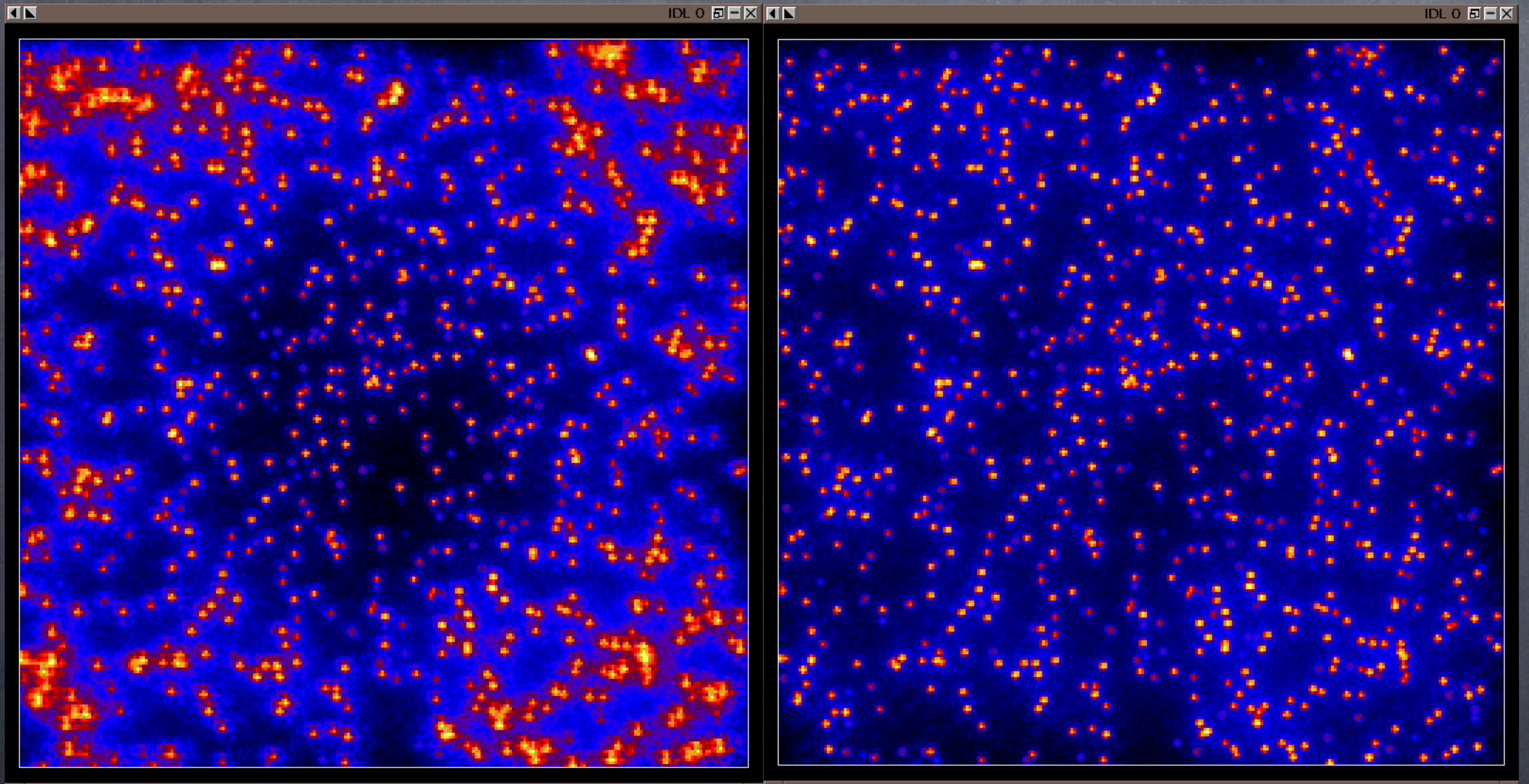
Concentration des photons dans le coeur cohérent

Morphologie de la PSF

Cas de l'AO grand-champ : anisoplanétisme...



Anisoplanétisme



(bande J, champ de 1', simu. B.Ellerbroek, Gemini Obs.)

Anisoplanétisme

