

Spécification des erreurs  
de surfaces en termes de la  
Densité Spectrale de Puissance, DSP

Kjetil Dohlen  
LAM

MOI oTOP

~~Carry le Rouet, Novembre 2020~~

Webinaire 14 janvier 2021

# [ Plan de l'exposé ]

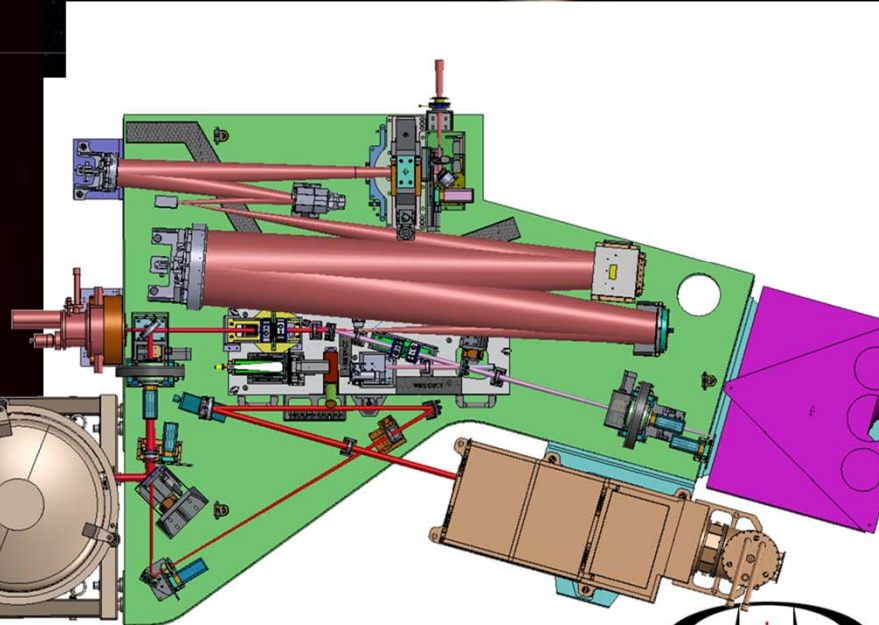
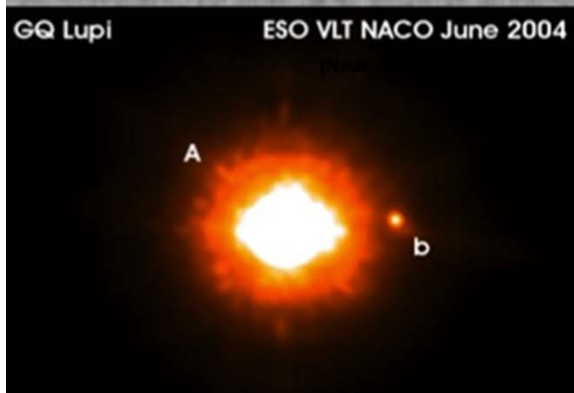
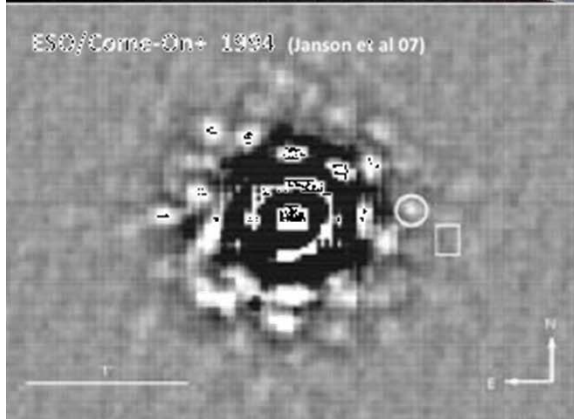
---

- Processus de spécification et exemples classiques
- Nouvelles approches imposées par les nouvelles technologies
- La décomposition en fréquences spatiales
- Exemples tirés du champ de l'astrophysique

- Polissage robot
  - Comment specifier
  - Colibri, exemples
  - Norme ISO
  - Science requirements
    - taille de la zone à specifier?
    - Simplicité!
  - Optimax: <https://www.optimaxsi.com/surface-roughness/>
- Analyse PSD par FFT
  - Importance de l'apodization

# Exemple: SPHERE

Sur le ciel depuis 2014



# Exemple: SVOM-Colibri

En cours de construction



## SVOM: mission spatiale franco-chinoise

- Le ciel transitoire
- Sursauts gamma, ondes gravitationnelles, ...

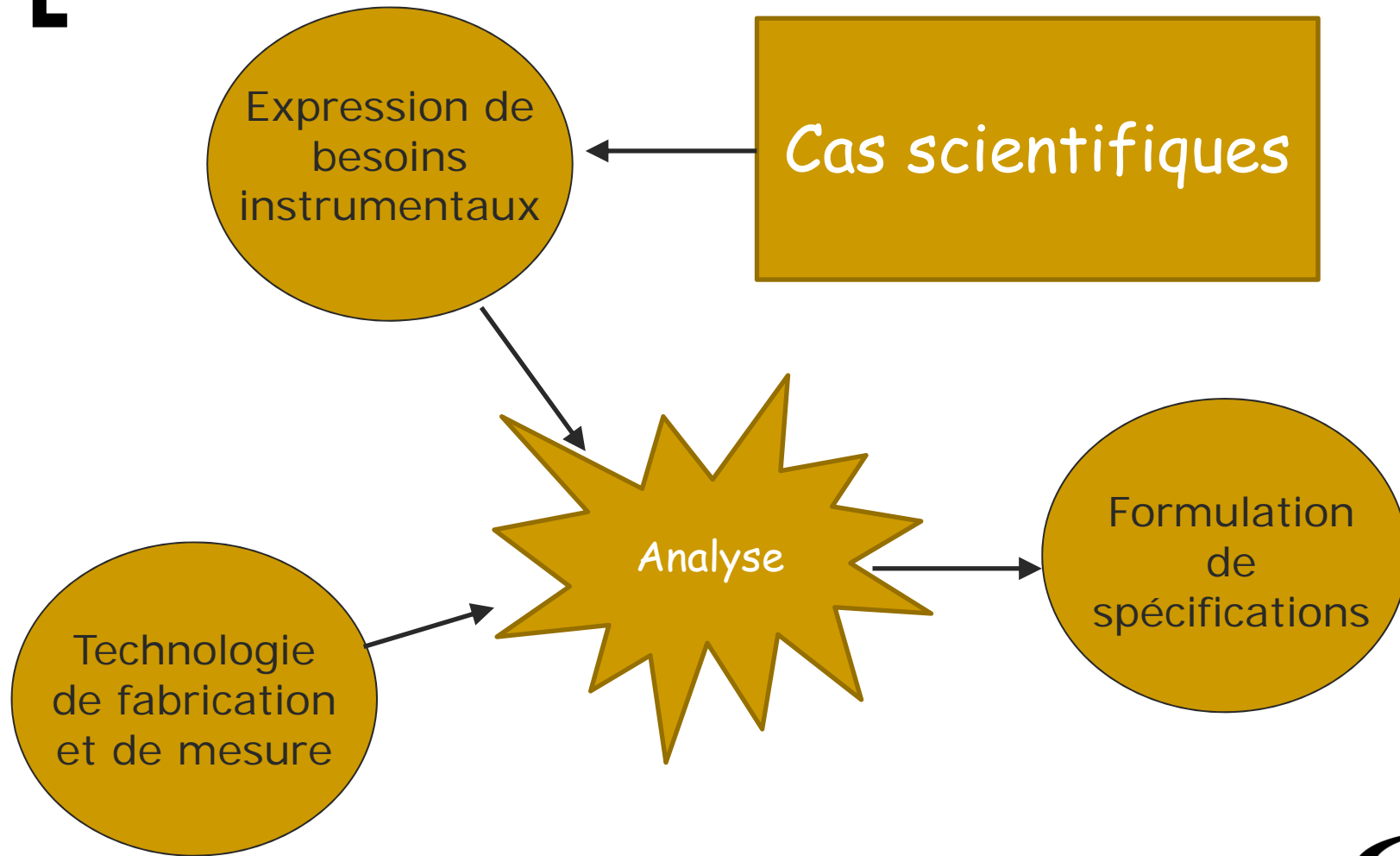


## Colibri: Télescope de suivi sol

- Sera installé à l'Observatoire San Pedro Martir au Mexique
- En cours de montage à l'OHP



# Processus de spécification



# Spécification classique: Limite de diffraction

## Besoin: Rapport de Strehl, S:

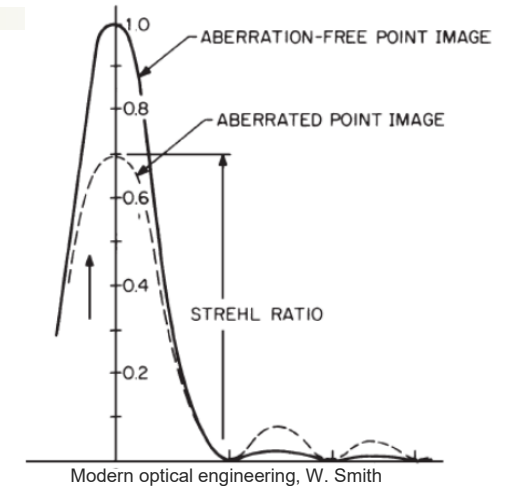
- $S > 80\%$
- Assure un bon piqué de l'image

## Analyse:

- Maréchal a dit:  $S \sim 1 - (2\pi\sigma/\lambda)^2$
- Permet de lier la performance à un mesurable:
  - $\sigma$ , la valeur "RMS" du front d'onde

## Spécification

- $S > 80\% \Rightarrow \sigma < 0.07\lambda = \lambda/14$
- Généralement dominé par les basses fréquences spatiales



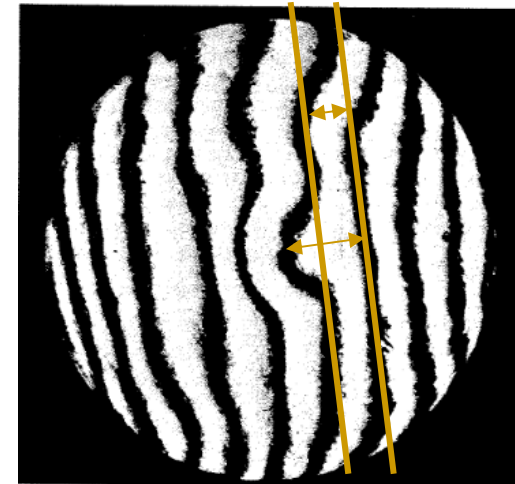
# Spécification - Critères classiques

Mesure par interférométrie et analyse de franges "à la main"

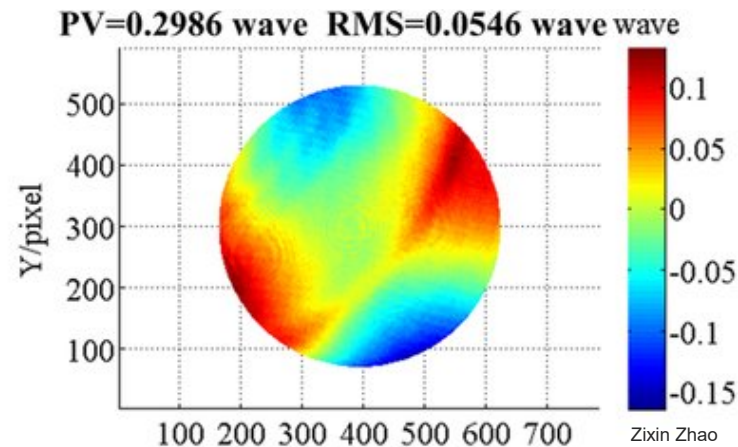
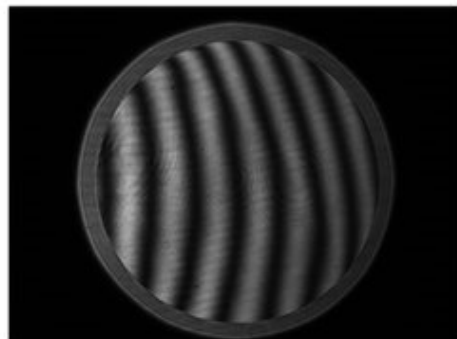
- Spécifier en terme de PTV,
- $PTV \sim RMS \times 3 \text{ à } 5 < \lambda/4$

Mesure par interférométrie avec décalage de phase

- Carte de phase à haute résolution
- Spécifier en termes de RMS, typiquement  $< \lambda/14$



J. C. Wyant, K. Creath

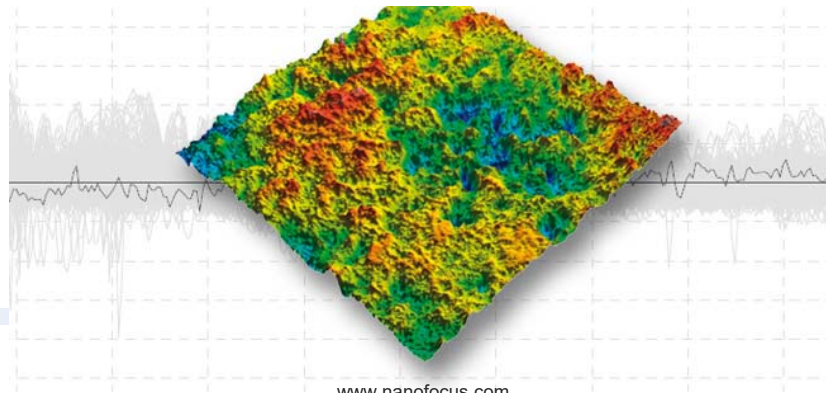




# Spécification classique: Rugosité de surface

## Besoin: Minimiser la lumière diffusée

- Affecte le contraste entre plages brillantes et sombres
  - Diffusion des objets éloignés ou hors champ
    - Les « spoilers »
    - Étoiles brillantes sur la ligne de visée des galaxies faibles
  - Objets faibles à coté d'un objet brillant et étendue
    - Eg. les jets de gaz sortant de la comète « Chourie » observés par Rosetta
- Dominée par les **hautes fréquences spatiales**
  - Rugosité, défauts cosmétiques
- Caractérisée par la diffusion total intégré: TIS
  - $TIS = (2\pi\sigma/\lambda)^2$
  - $\sigma$ , la valeur **RMS des hautes fréquences du front d'onde**



www.nanofocus.com

# [ Spécification non classique ]

Des approches d'analyse et de spécification non classique peuvent être imposées par

- Besoins scientifiques nouvelles
  - Astrophysique (exo-planètes, ondes gravitationnelles, ...)
  - Lithographie UV pour la micro-électronique
  - Lasers de puissance
  - etc
- Méthodes de fabrication nouvelles
  - Usinage diamant
  - Polissage robotique
  - etc

Nous cherchons une approche capable de lier la physique de l'imagerie à la physique de la fabrication

# Spécification selon besoin:

## - Critères spécifiques

- Recherche de **planètes** autour d'une étoile
  - Le halo de tavelures (speckles) représente un bruit dans lequel les planètes se perdent
- Etude d'objets faibles dans un champ dense
  - Eg. détection de sursauts gamma (**GRB**) et sources d'ondes gravitationnelles (**GW**)
  - Un halo asymétrique est difficile à modéliser et de soustraire
- Ces effets sont affectés par les **moyennes fréquences spatiales**

SPHERE

Colibri

# [ Analyse spectrale du front-d'onde ]

La fonction pulsionnel (PSF) est lie à la transformée de Fourier (TF) du champ électrique  $E$  dans la pupille:

- $PSF = |TF\{E\}|^2$

Champ électrique dans la pupille ( $P$ ) pour aberrations  $\Phi$ :

- $E = P e^{i\Phi} \sim P(1 + i\Phi - \Phi^2/2 + \dots)$

Utilisant l'approximation linéaire, valable pour des aberrations faibles, on trouve:

- $PSF \sim S p^2 - 2\sqrt{S} p[p^*Im(\phi)] + |p^*\phi|^2$  Tavelures développées,  $I_{halo}$

Avec

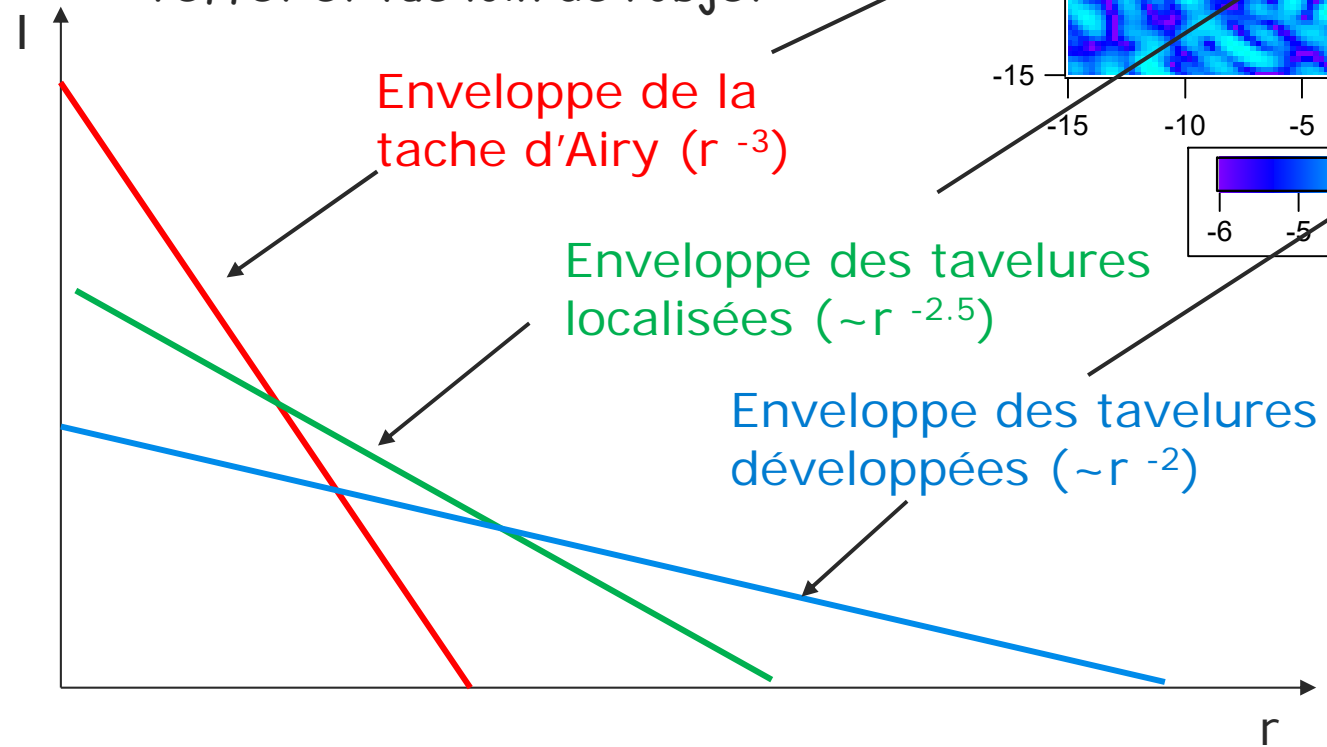
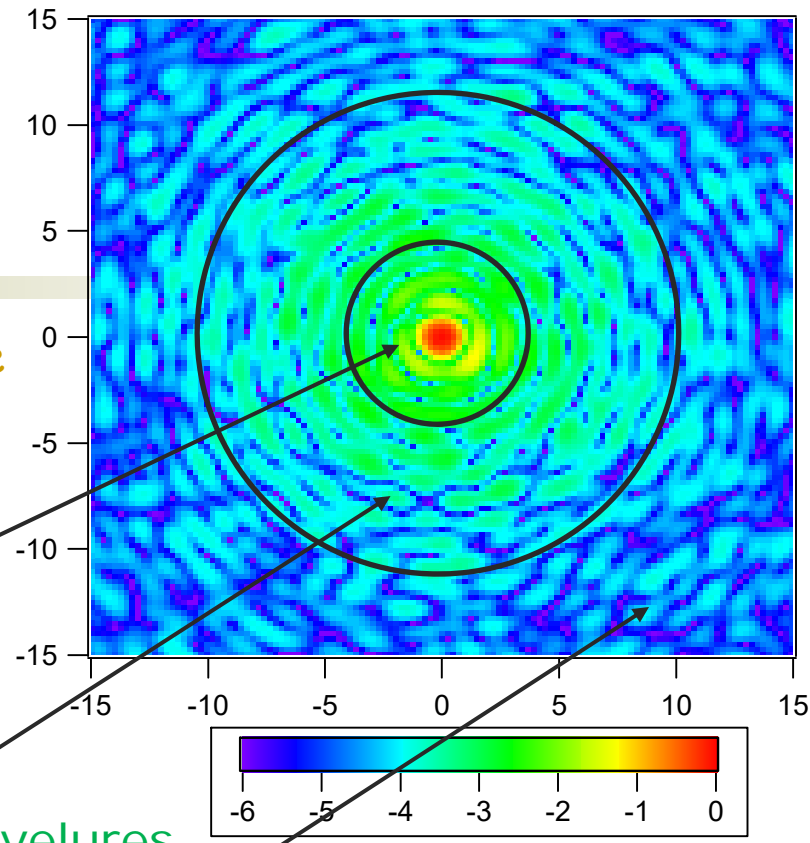
- $\phi = TF\{\Phi\}$
- Tache d'Airy
- Tavelures localisées «Pinned speckles»

Bloemhof et al A&A 2005

# Structure de la PSF

La transformée de Fourier (TF) décompose le front d'onde en composants sinusoïdaux

- Réseaux de diffraction
- Plus la fréquence est élevée, plus l'effet est vu loin de l'objet



Enveloppe de la tache d'Airy ( $r^{-3}$ )

Enveloppe des tavelures localisées ( $\sim r^{-2.5}$ )

Enveloppe des tavelures développées ( $\sim r^{-2}$ )

# Liaisons avec la densité spectrale de puissance, DSP

L'onde en radians est liée aux aberrations  $W$  en nm

- $\Phi = 2\pi/\lambda W$

On pourra donc exprimer le halo de tavelures en fonction des aberrations:

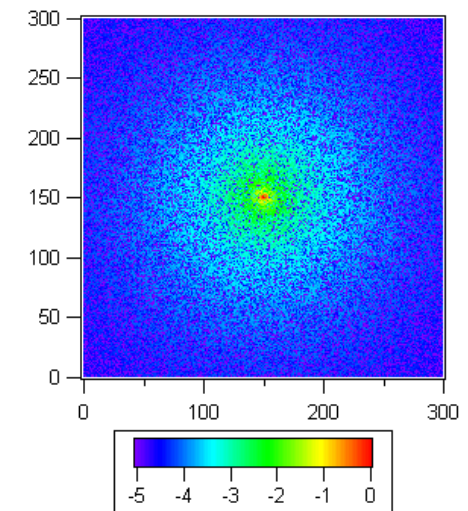
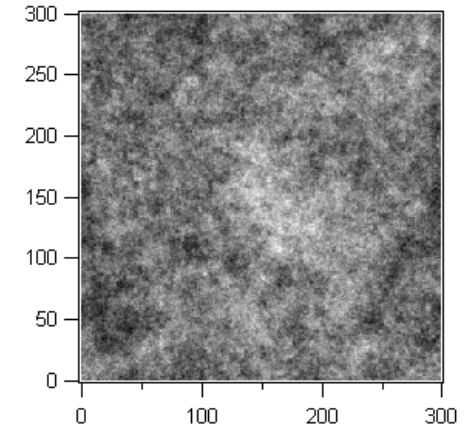
- $I_{\text{halo}} \sim |p^* \phi|^2 = [2\pi/(\lambda D)]^2 |\text{TF}\{P W\}|^2$

La DSP est la transformée de Fourier des aberrations du front d'onde  $W$  en nm, borné par la pupille  $P$

- $\text{DSP} = |\text{TF}\{P W\}|^2$ .

Donc:

- $I_{\text{halo}} \sim [2\pi/(\lambda D)]^2 \text{DSP}$



# Interprétation physique

L'intégrale de la DSP est égale à la variance du front d'onde, le carré de sa valeur RMS:

- $\sigma^2 = \iint \text{DSP}$

Cet RMS a différentes significations selon les bornes de l'intégral

- Définition des bandes dépend de l'application
- **Basses fréquences**, typiquement dans la gamme 1-10 c/pup
  - Forme des surfaces, souvent caractérisés par les coefficients de Zernike
  - Mesuré par interféromètre
  - Affecte généralement le rapport de Strehl
- **Hautes fréquences**, typiquement dans la gamme >100 c/pup
  - Rugosité des surfaces
  - Mesuré par profilomètre ou microscope interférentiel
  - Affecte le TIS
- L'intégrale de l'halo des tavelures est égale à la diffusion totale, ou TIS (total integrated scatter)
  - $\text{TIS} = \iint I_{\text{halo}}$
- Nous retrouvons donc l'expression classique du TIS:
  - **TIS** =  $(2\pi\sigma/\lambda)^2$

# [ Et alors, quid des **moyen-fréquences** ? ]

La bande intermédiaire a tendance à être ignorée

- « Absente » dans le polissage classique de bonne qualité
- Concerne les défauts de surface typiquement dans la gamme 10-100 c/pup
- Structure des surfaces, souvent représentant des résidus de surfaçage
  - « Peau d'orange » sur surfaces polis de qualité médiocre
  - Traces d'outils d'usinage diamant
  - Traces d'outils de polissage par **méthodes robotiques**
- Mesure par interféromètre à décalage de phase
- Affecte généralement le halo intermédiaire de la PSF
  - Responsables des tavelures « mangeurs de planètes » dans l'imagerie haut contraste
  - Responsable de l'apparition d'effets néfastes pour la recherche de GRBs et de GWs
  - Effets d'absorption d'énergie dans les applications laser de puissance
  - etc

Difficulté:

Comment le caractériser et spécifier de façon simple et sans ambiguïté ?



# [ La réponse idéale: la DSP ]

La DSP d'un front d'onde est bidimensionnel (2D) par nature

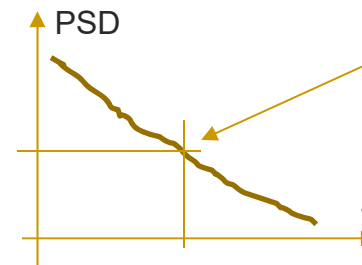
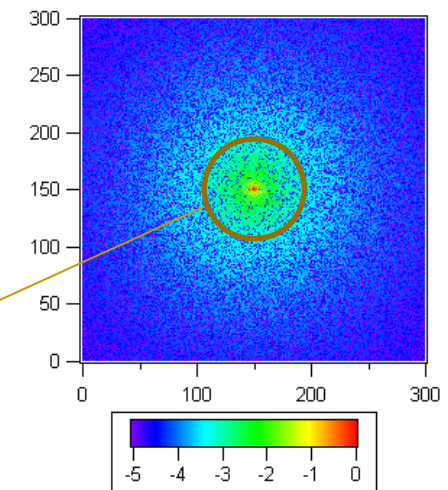
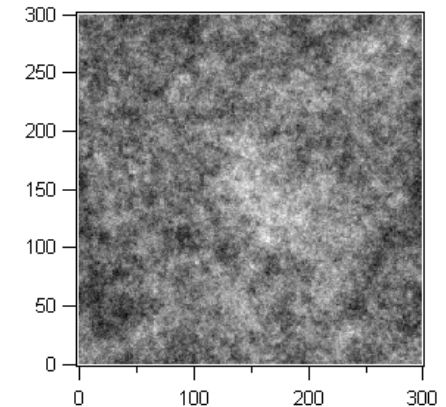
Peut être exprimée sous forme d'une image 2D

- Obligatoire pour surfaces non isotropes
- Intensité logarithmique
- Codes couleurs

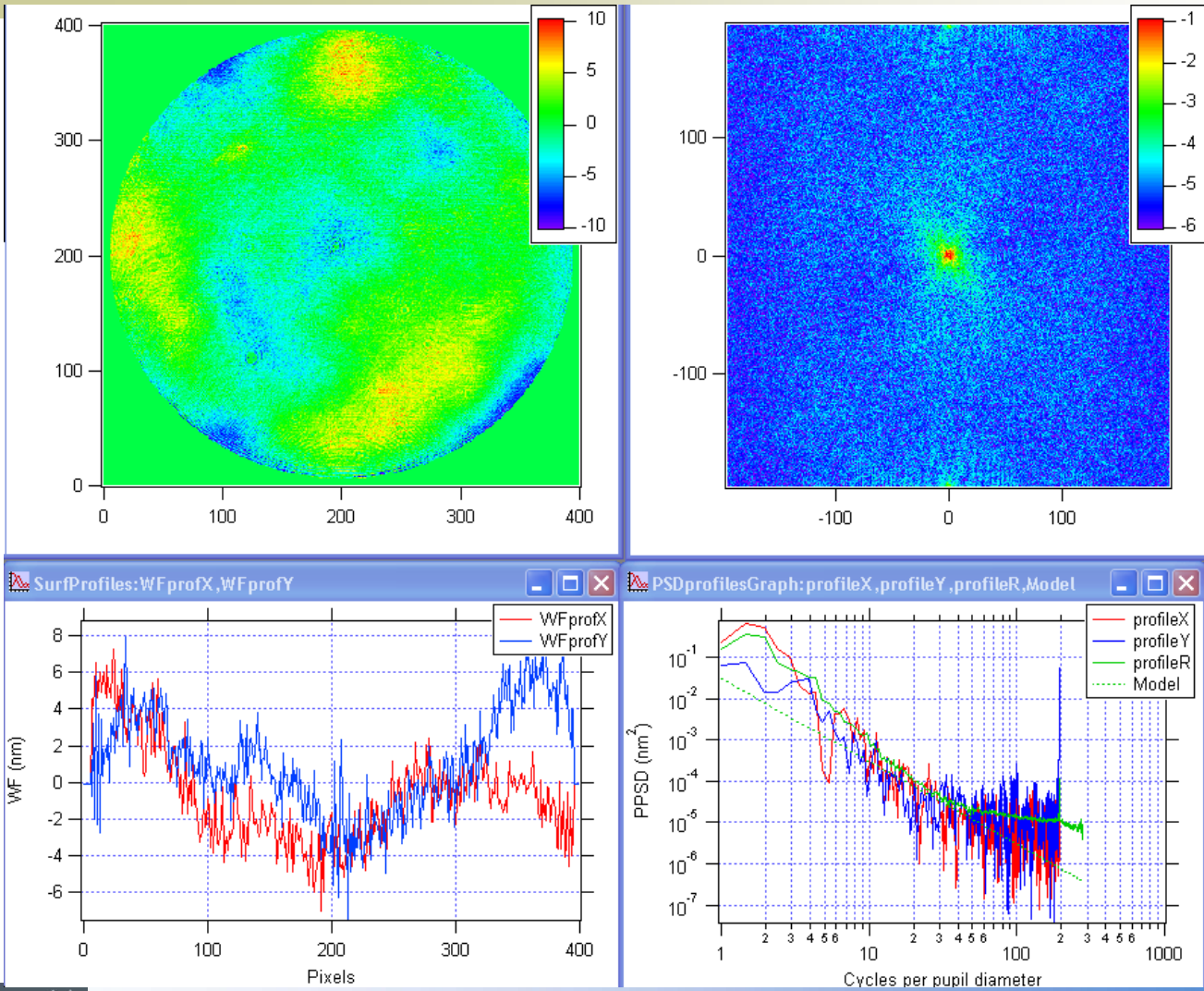
Pour surfaces isotropes, on peut l'exprimer sous forme d'un profil, la **moyenne azimutale**

- Courbe lisse
- Représentative de la statistique de la surface
- Forme fonctionnel typiquement
  - $DSP \sim A f^{-n}$

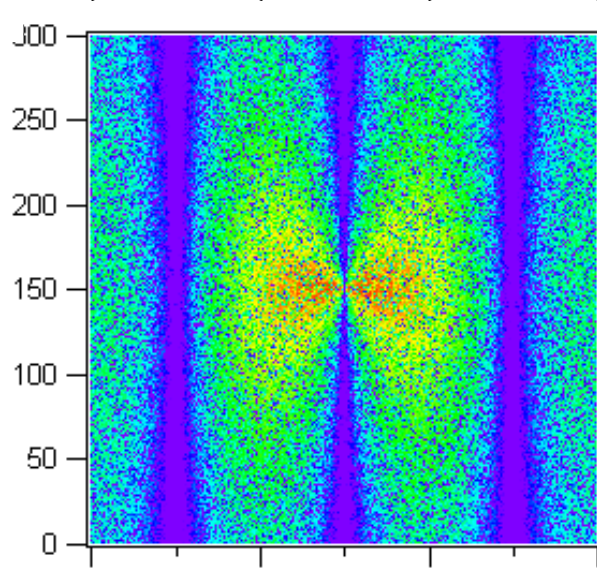
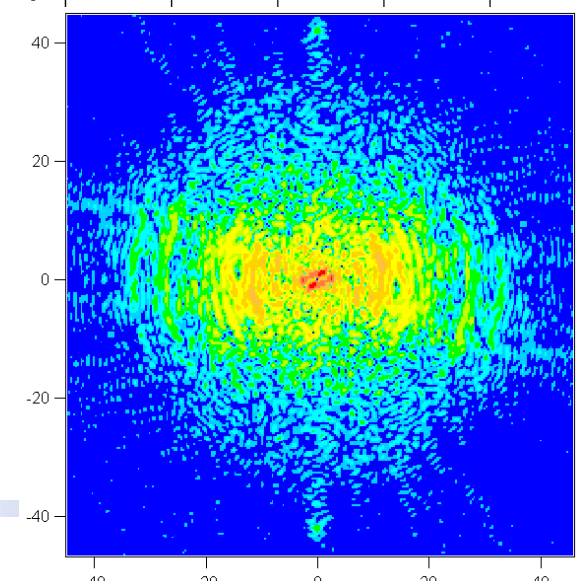
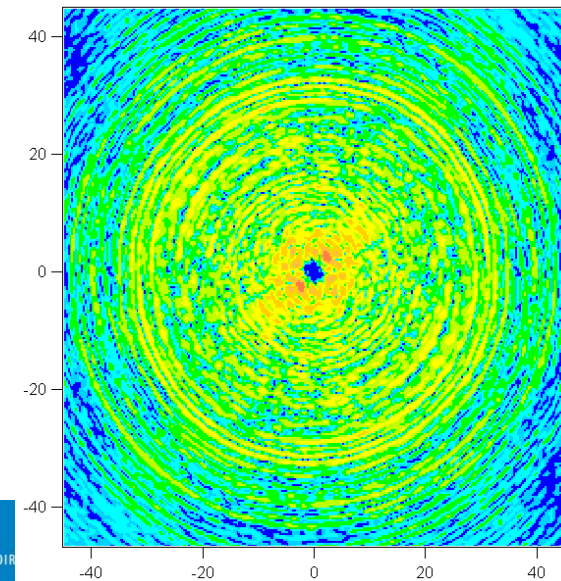
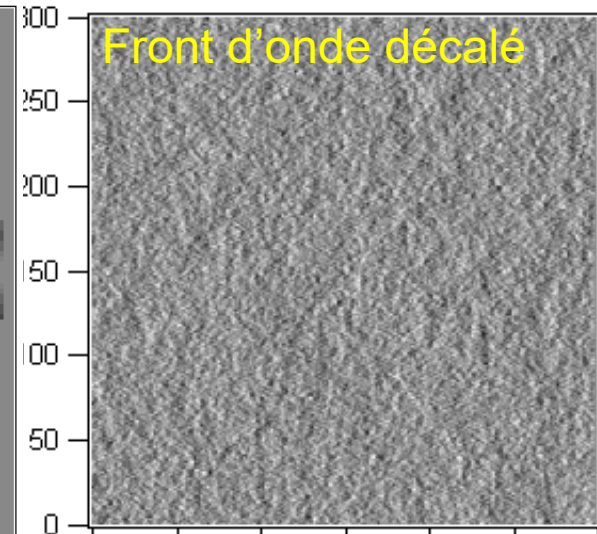
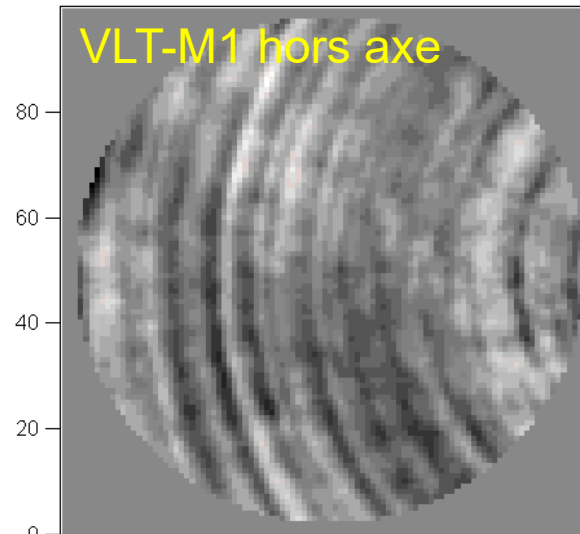
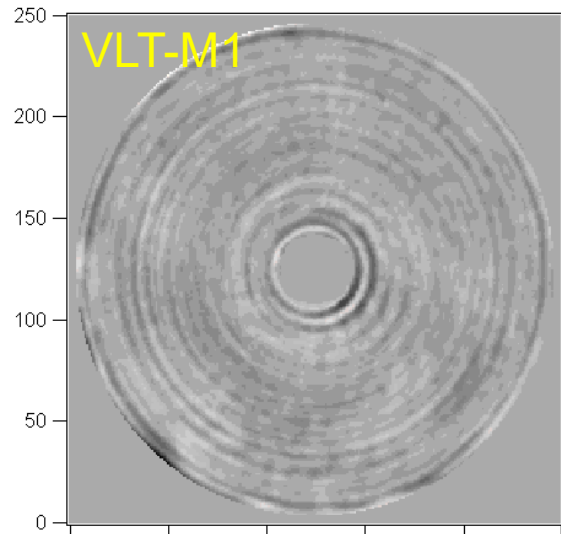
A ne pas confondre avec la DSP 1D !



# Exemple: DSP 2D isotropique (ou presque)



# Front-d'ondes non-isotropes



# L'unité de la DSP

La DSP décrit la puissance contenue dans une bande passante unitaire  
 L'unité de puissance est le carré de l'unité de déformation du front d'onde

- Typiquement  $\text{nm}^2$

L'unité de la bande passante spectrale est l'inverse de l'unité spatial du front d'onde

- Typiquement  $\text{mm}^{-1}$  ou « cycles par pupille » (c)

Pour une DSP 2D, la bande passante unitaire est un petit carré

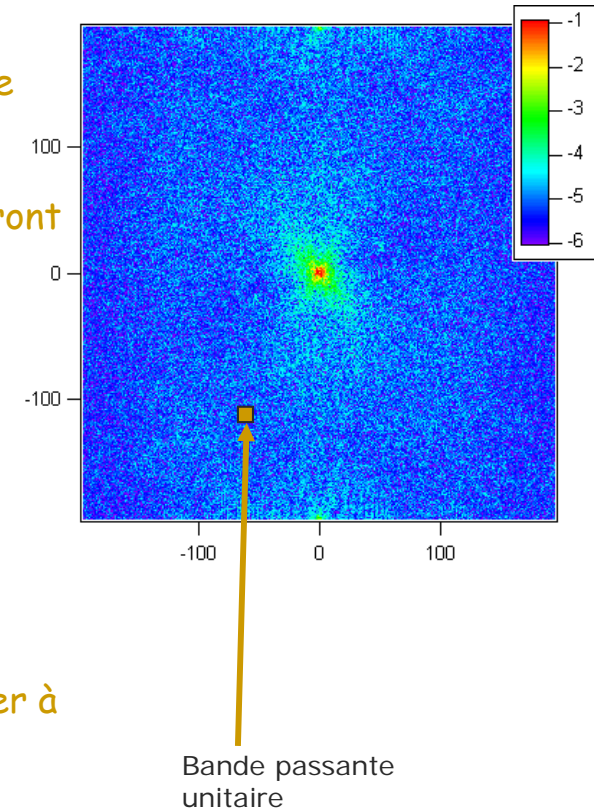
- L'unité de la DSP est donc  $\text{nm}^2 / (\text{unité de fréquence})^2$

Pour l'étude et la caractérisation d'état de surfaces générale

- L'unité de  $\text{mm}^{-1}$  pour la fréquence spatial s'impose
- L'unité de la DSP devient donc  $\text{nm}^2 \text{mm}^2$  (ou même  $\text{nm}^4$ )

Pour l'analyse de performances optiques, il est plus commode de se référer à la pupille  $\rightarrow \text{DSPP} = \text{DSP} / D^2$

- L'unité de fréquence est alors les « cycles par pupille » (c)
- L'unité de la DSPP  $\text{nm}^2$
- Indépendant des dimensions de chaque optique

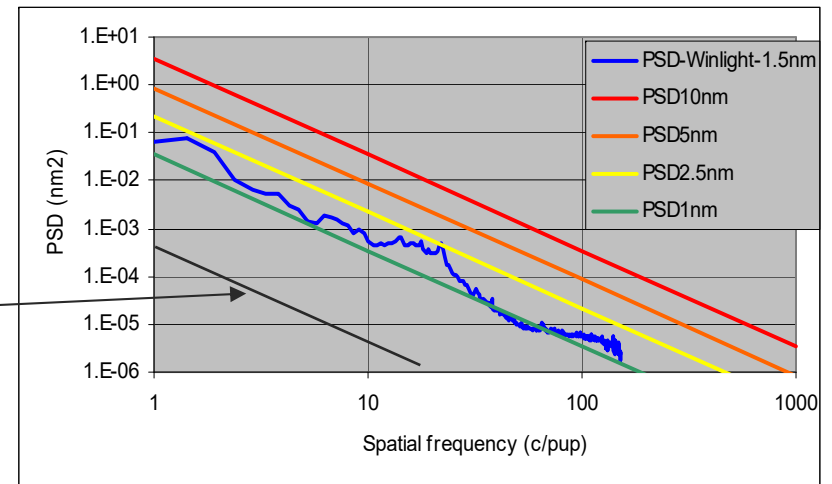
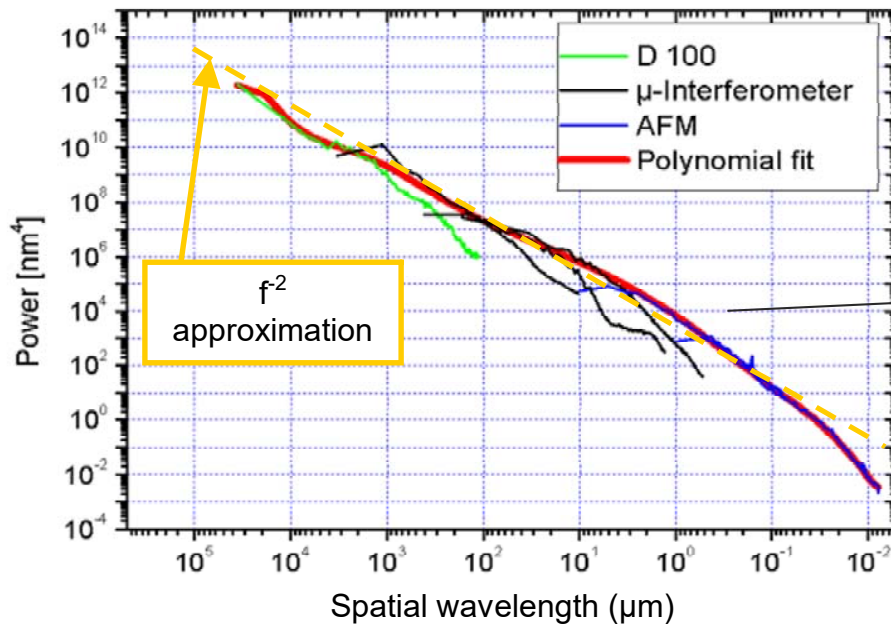
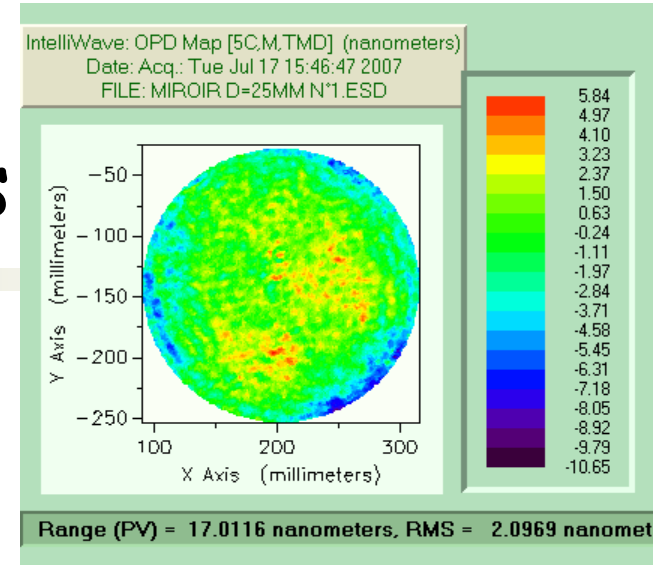


Attention, pour le DSP 1D, l'unité est  $\text{nm}^2 \text{mm}$  ou  $\text{nm}^3$   
 Pas facile de s'y retrouver

# Performances atteignables

## DSP obtenu pour la micro lithographie UV

- Fonction en  $f^{-2}$  sur 6 decades
- 0.2nm rms



## DSPP obtenu pour les optiques de SPHERE

- Fonction en  $f^{-2}$  confirmée

H. Enkisch and J. Trenkler, Carl Zeiss  
Europhysics News (2004) Vol. 35 No. 5

<http://www.europhysicsnews.com/full/29/article3/article3.html>

# Fonction en $f^{-2}$ : Une loi générale?

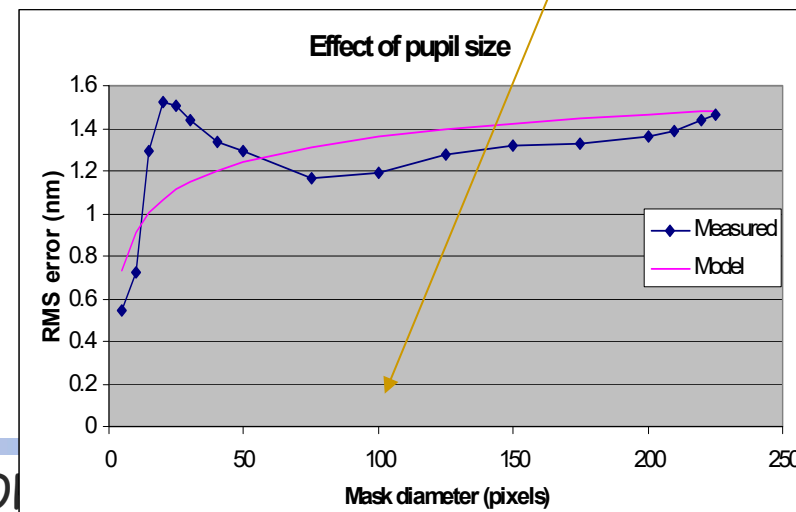
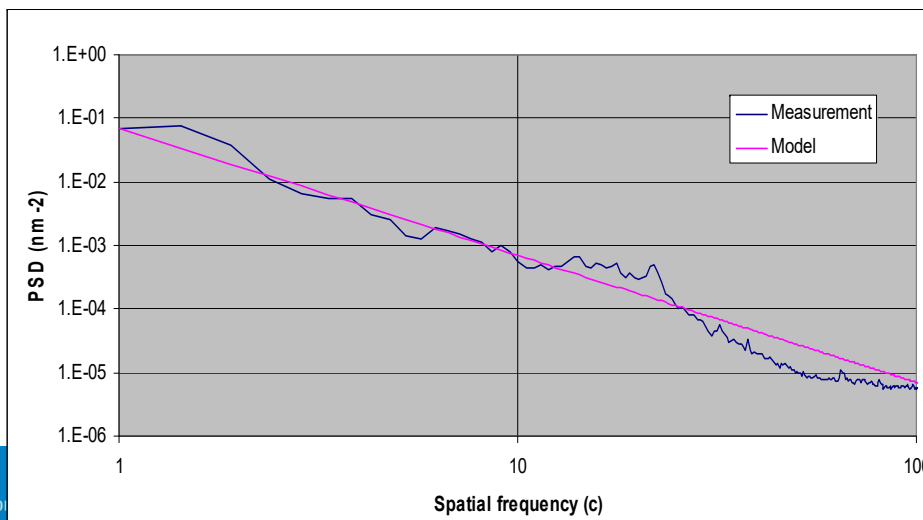
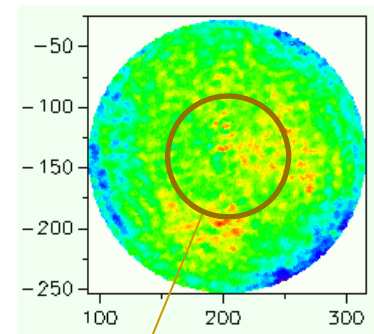
Classifié comme « fractale extrême » par Church (Appl. Opt. 1988)

- Pas de consensus dans la littérature
- Semble pourtant être le cas pour de très bonnes surfaces
- Adopté pour le budget de SPHERE

Effet de réduire la pupille

- Pour  $PSD = PSD_0 f^{-2}$
- Intégrale entre bornes  $f_{Hi}$  et  $f_{Lo}$
- $\sigma^2 = 2\pi \int PSD f df = 2\pi PSD_0 \int 1/f df = 2\pi PSD_0 \ln(f_{Hi}/f_{Lo})$

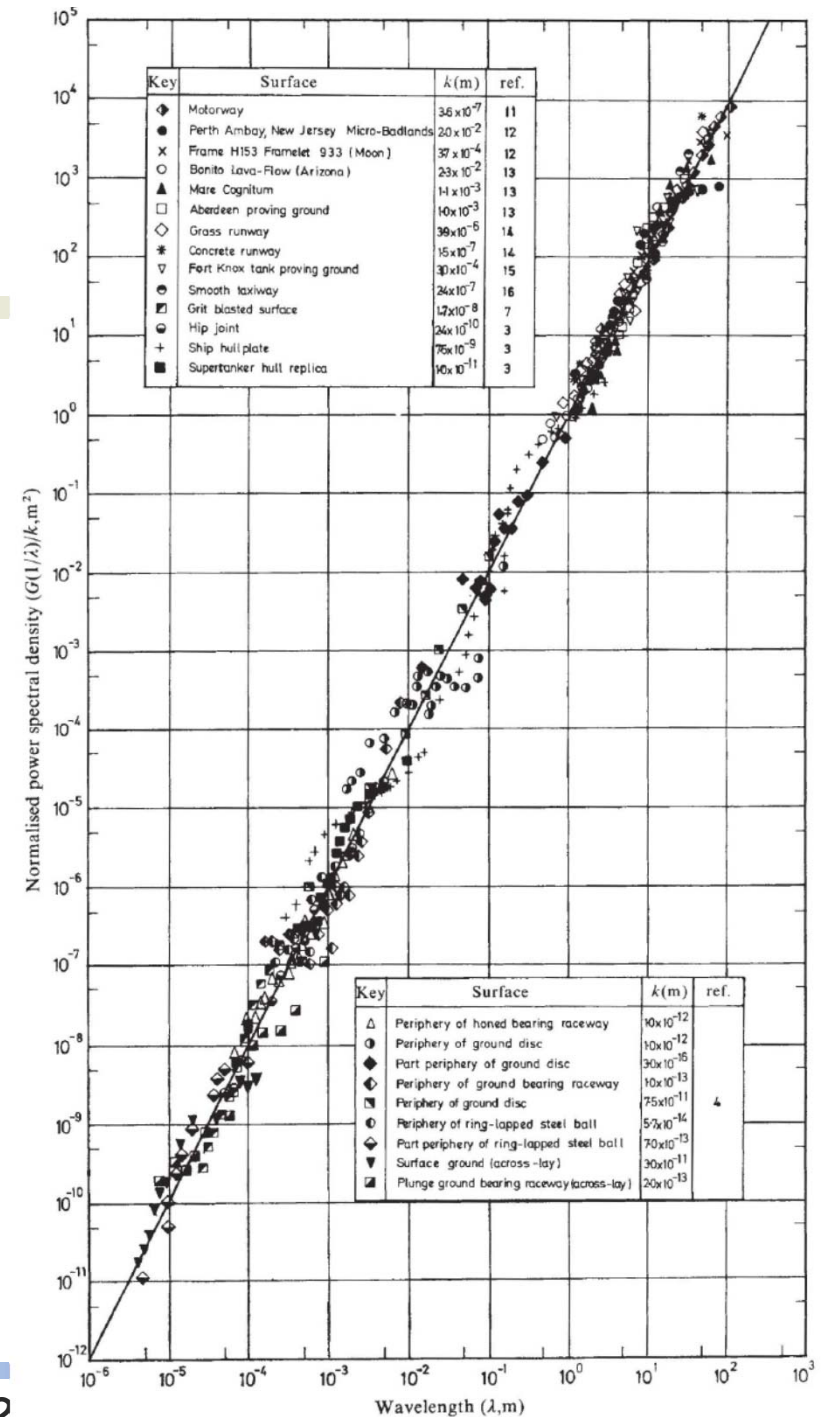
- Pour les surfaces en  $f^{-2}$ , le RMS est indépendant du diamètre de la pupille !



# Sayles and Thomas (Nature 1978)

La loi en  $f^{-2}$  se confirme  
de façon générale,

- Des surfaces polies...
- Jusqu'aux pistes d'aéroports !

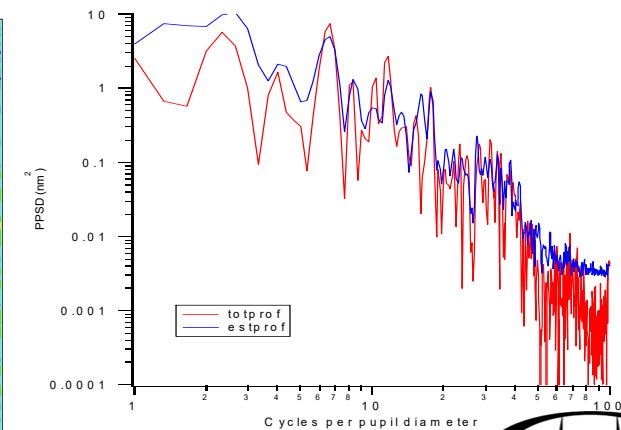
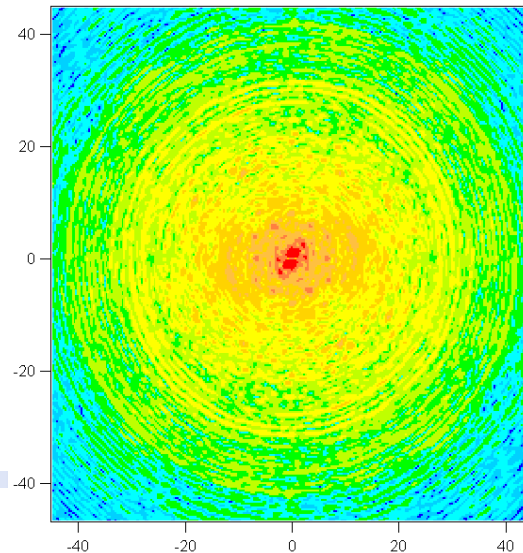
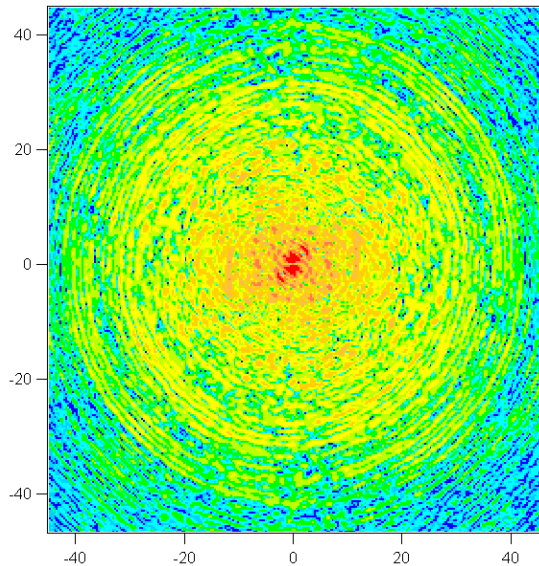


# Budget d'erreurs en DSP

On peut estimer le DSPP total d'un système comme la somme des DSPP de chaque surface

$$DSPP_T \sim \sum DSPP_i$$

- La somme permise grâce à la normalisation sur la pupille
- Correspond au budget classique des RMS en somme quadratique

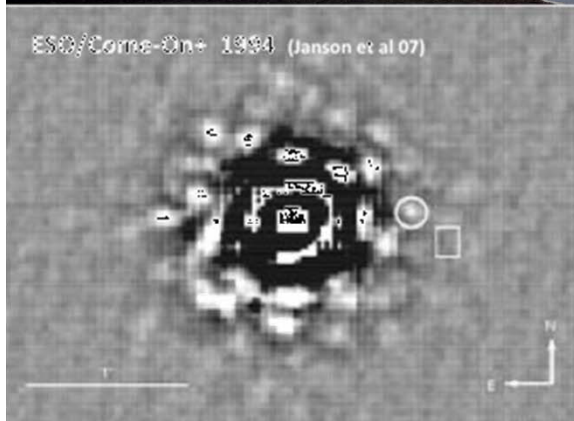




# Exemple: SPHERE



ESO/Cornu-On+ 1994 (Janson et al 07)

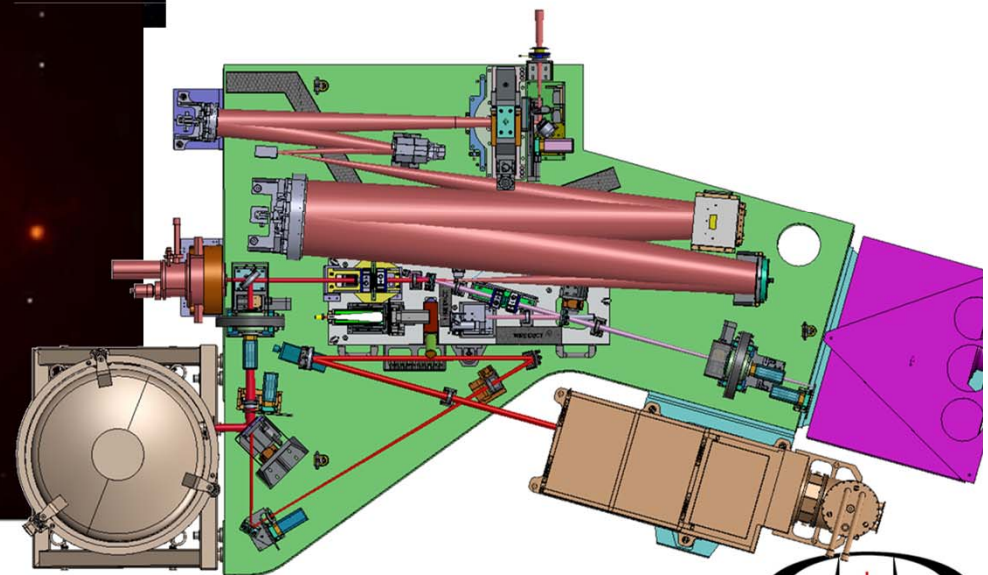
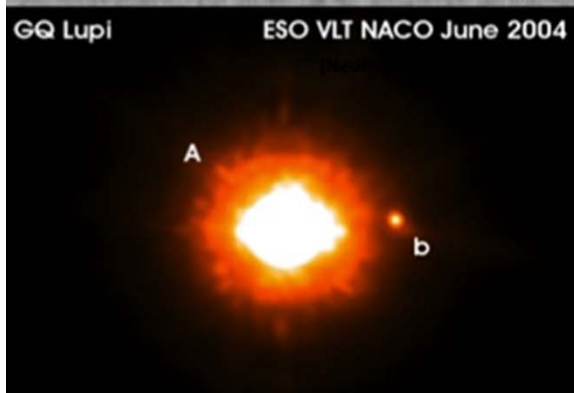


SPHERE/IRDIS 2015

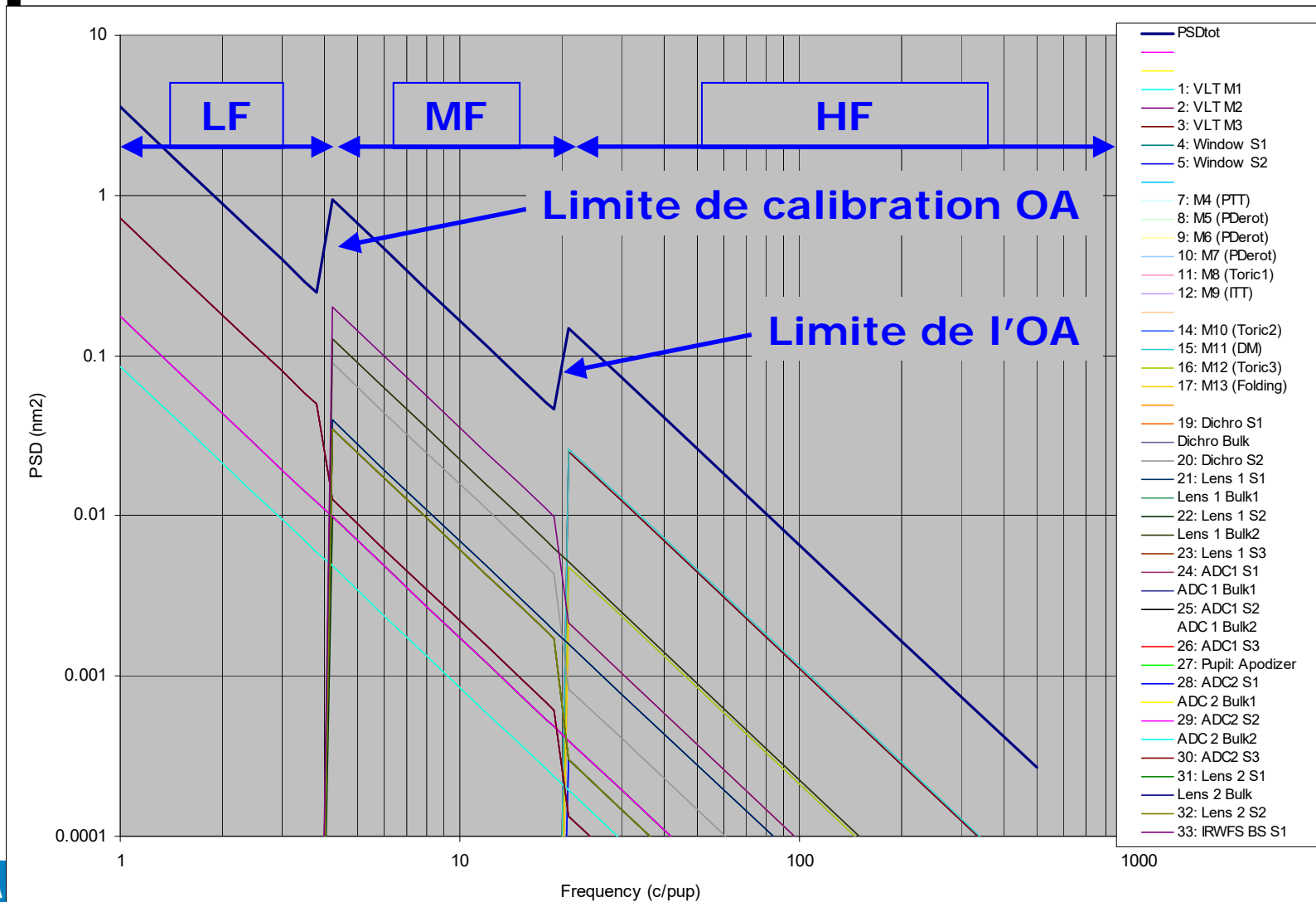


GQ Lupi

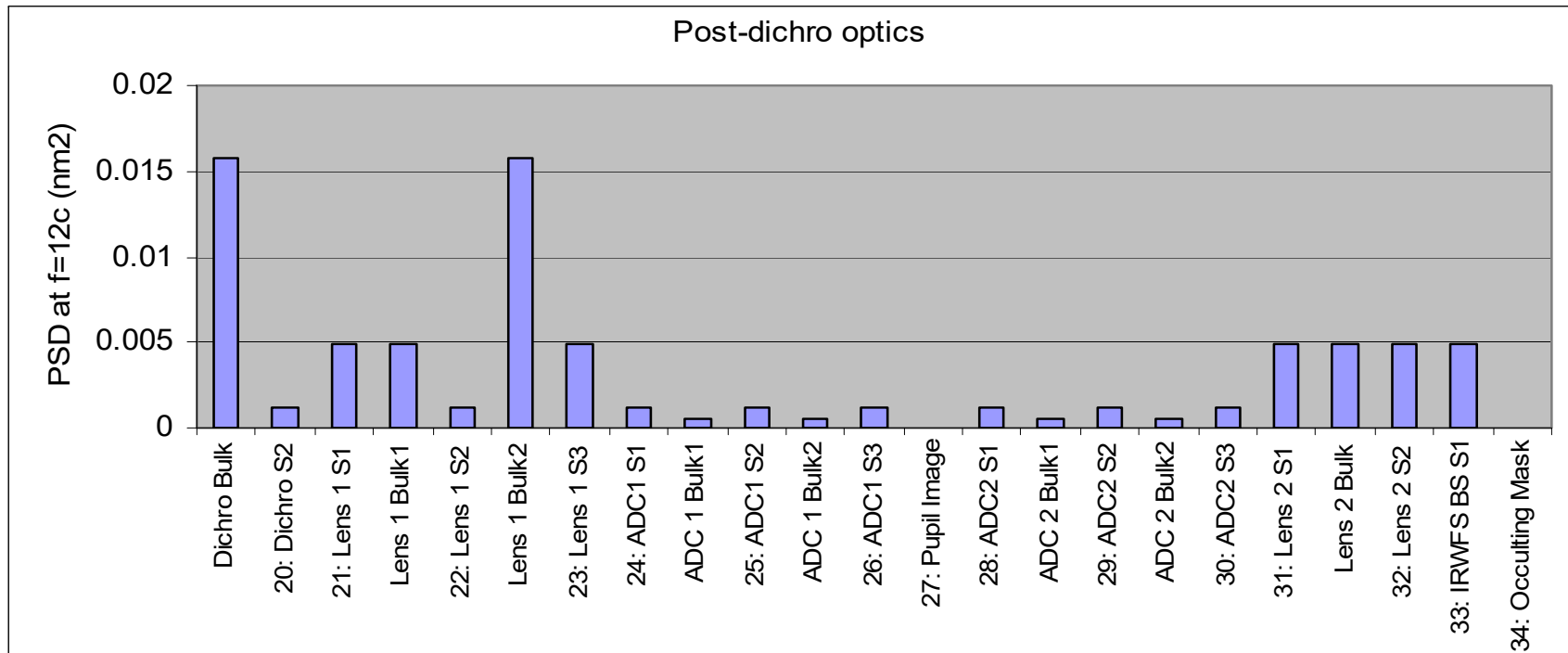
ESO VLT NACO June 2004



# Budget de SPHERE



# Identification de contributeurs majeurs



# [ Mais alors, comment spécifier ? ]

## Spécifier un gabarit de DSP ?

- DSP 2D?
- Profile de DSP 2D?
- DSP 1D?

## Gabarit sous forme de valeur « origine », $A$ , et « pente », $n$ :

- $DSP < A f^{-n}$ , avec  $A = DSP(f=1)$

## Difficultés

- Outil d'analyse « standard » n'existe pas
- Formalisme de spécifications pas bien adapté
- ISO 10110 propose uniquement un formalisme pour le DSP 1D
- Complexité et coût des mesures

Un travail de standardisation s'impose!

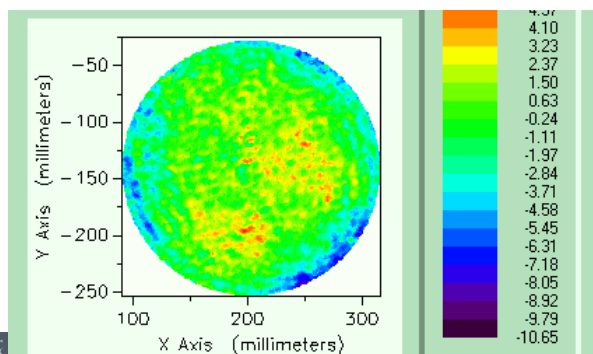
# Exemple: Les optiques de SPHERE

Spécifier polissage avec outil plein taille, plans et sphères uniquement

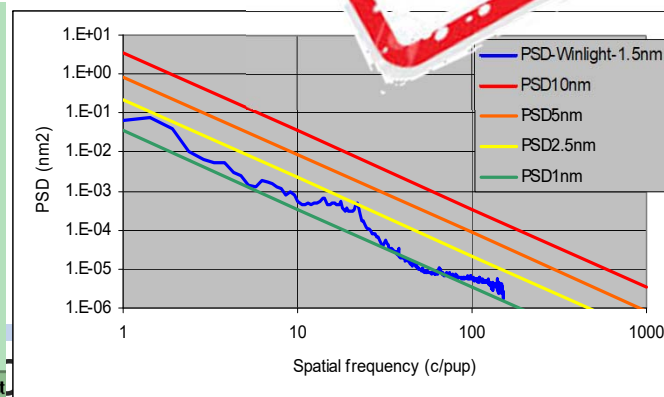
- Assure surfaces isotropes
- Évite zonage fin
- Miroirs toriques polis sous contrainte

Pour les surfaces les plus critiques: vérifier la « loi » de  $f^{-2}$

- Spécifier 1.5-2nm rms
- Démonstration par prototypage
- Mesures interférométriques avec bonne résolution spatiale



Range (PV) = 17.0116 nanometers, RMS = 2.0969 nanometers



# [ Exemple: SVOM-Colibri

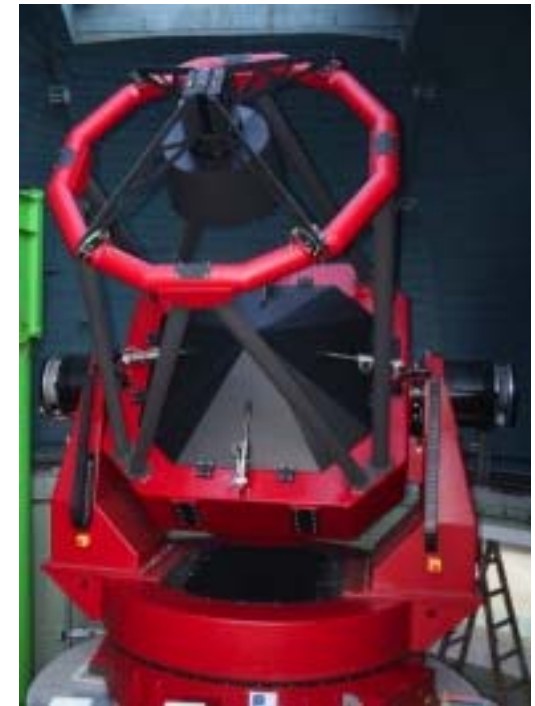


## SVOM: mission spatiale franco-chinoise

- Le ciel transitoire
- Sursauts gamma, ondes gravitationnels, ...

## Colibri: Télescope de suivi sol

- Miroirs livrés sous responsabilité LAM
  - M1 poli classique (Astro Optique Cardoen)
  - M2 poli robot (Winlight)
  - Appairage et retouches (Cardoen)



# Résultats obtenus pour M2 de Colibri

## Spécification surface

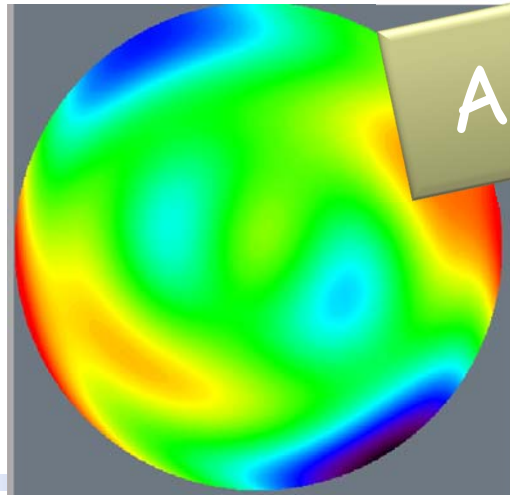
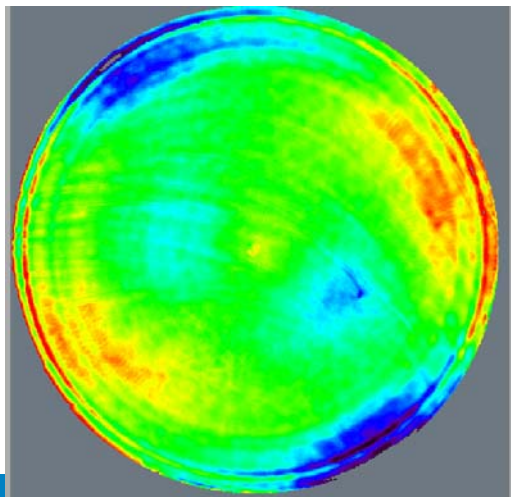
- 60nm RMS global
- 15nm RMS 36 Zernikes soustraites

Contrôle des basses fréquences

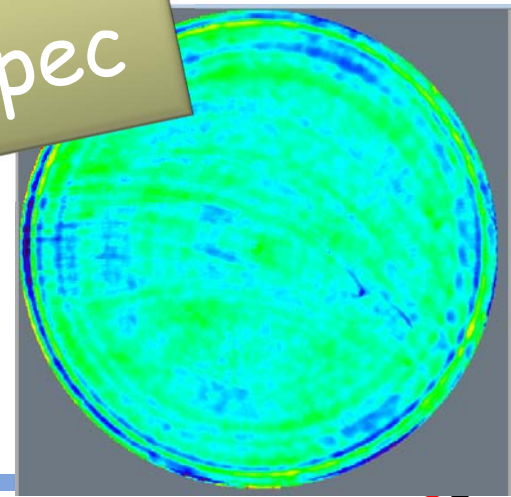
Contrôle des hautes fréquences

## Mesures fabriquant

- 38nm RMS global
- 14nm RMS 36 Zernikes soustraites



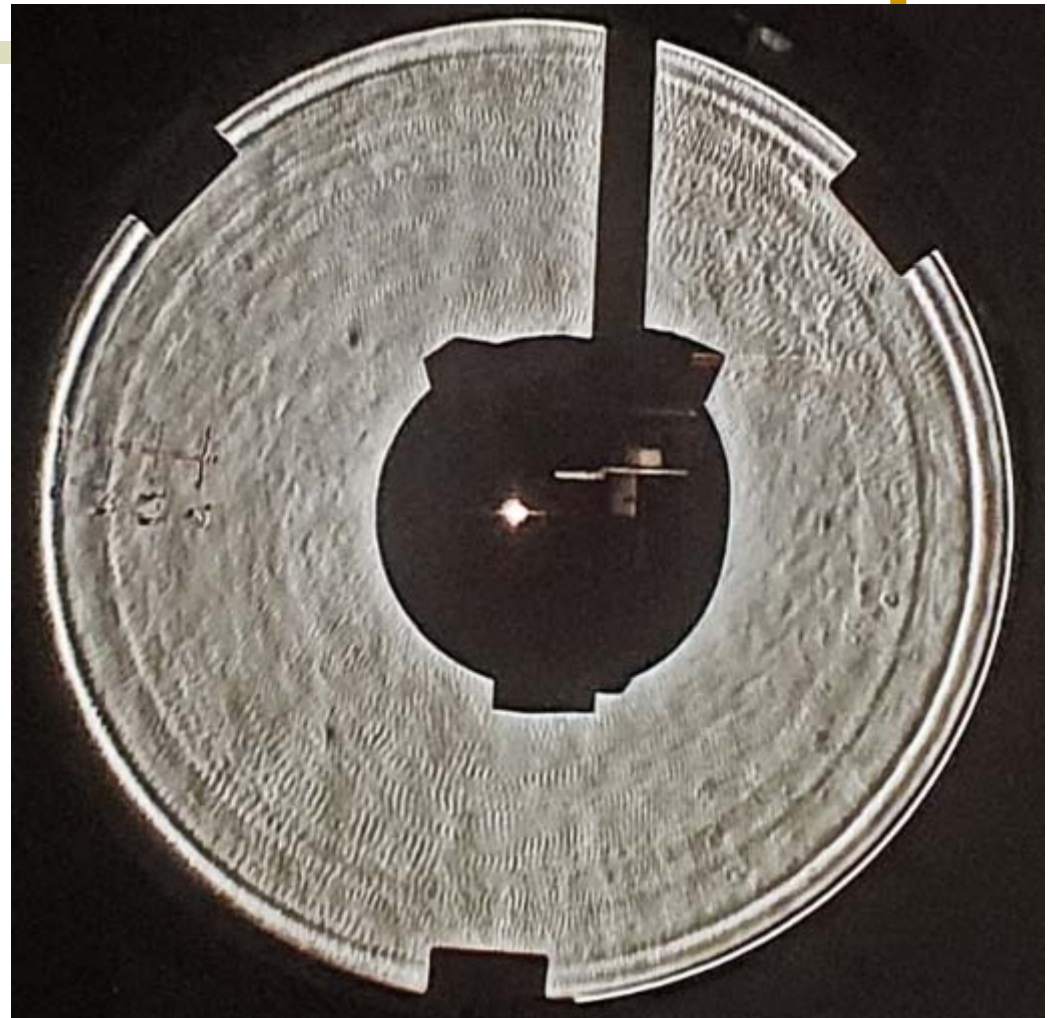
Au spec



# Analyse des défauts

## Foucaultage effectué par Cardoen

- Structures moyen-féquences observés
  - Zonage annulaire
  - Traces transversales
- Origine robotique
- Quel effet sur la performance?

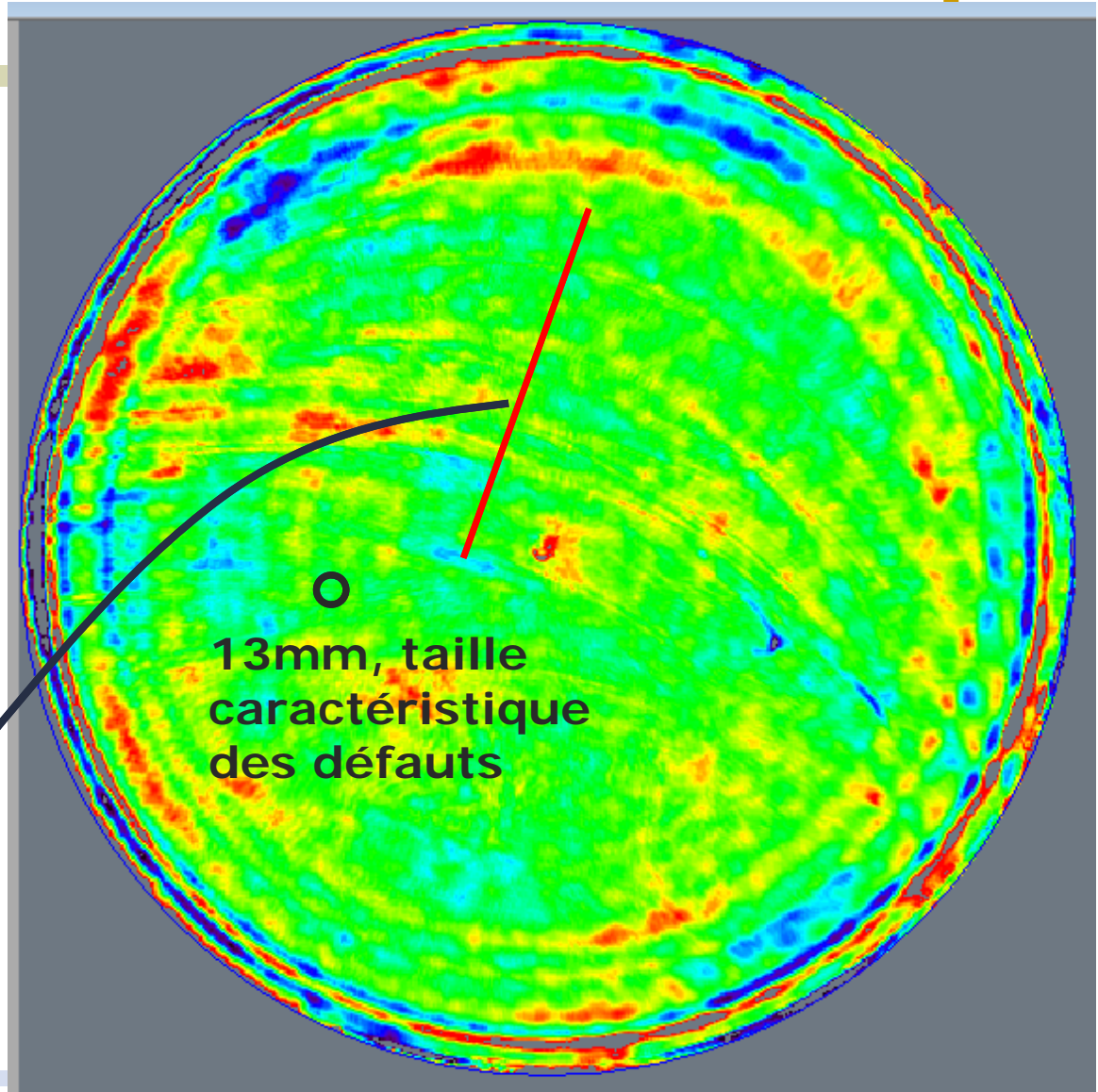
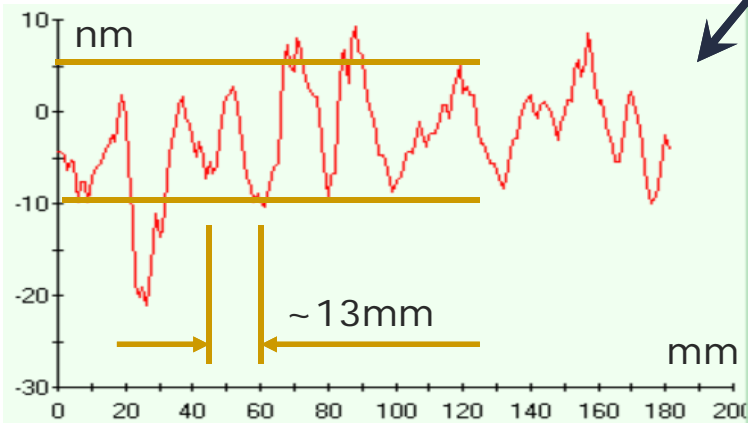




# Analyse des structures moyen- fréquences

Structure retrouvée dans les  
interférogrammes

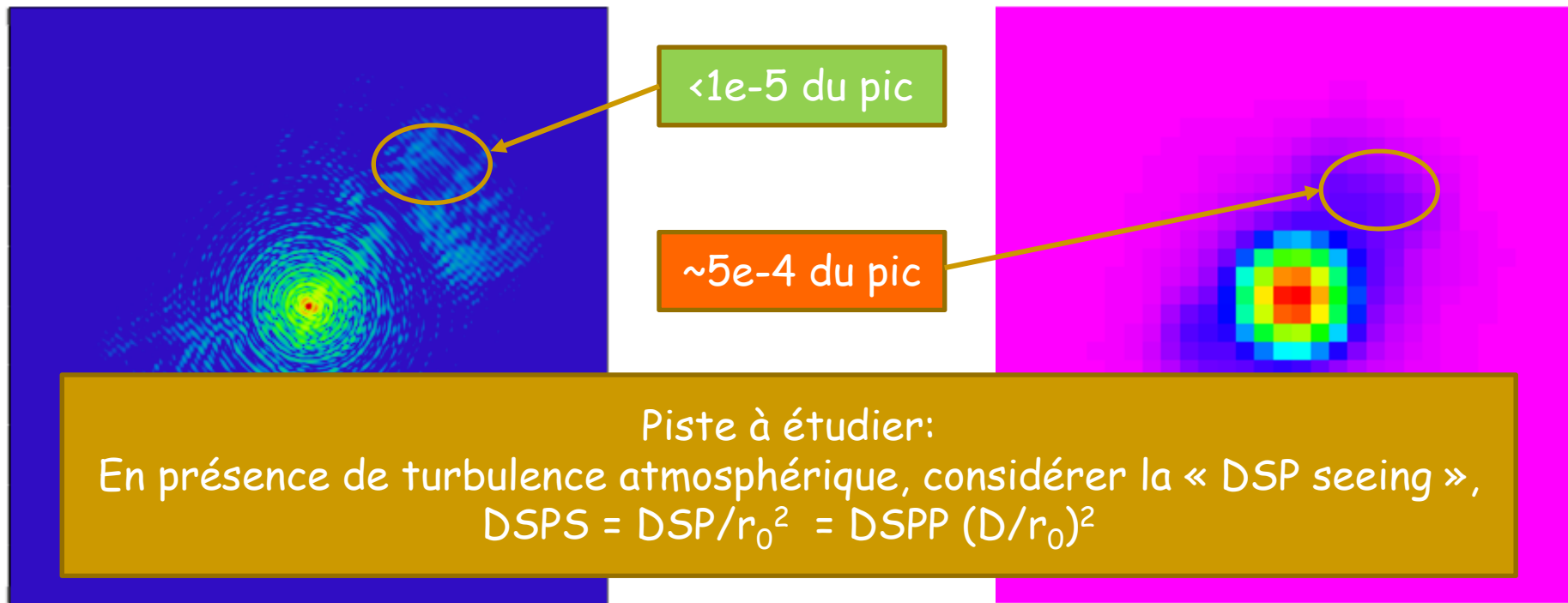
- Zonage annulaire
- Traces transversales
- Taille caractéristique  
13 mm



# Effet sur la PSF : asymétries

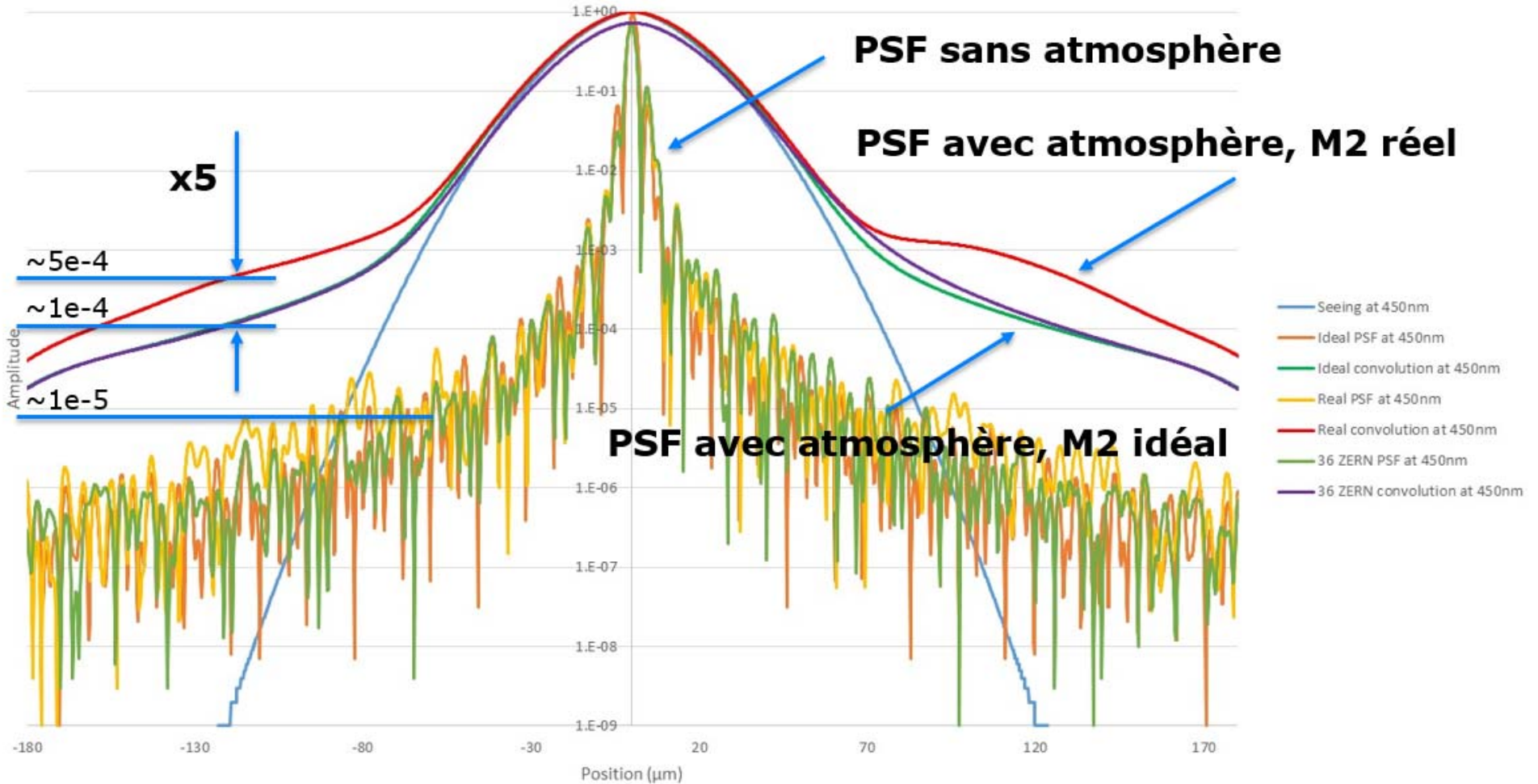
Sans atmosphère

Avec atmosphère

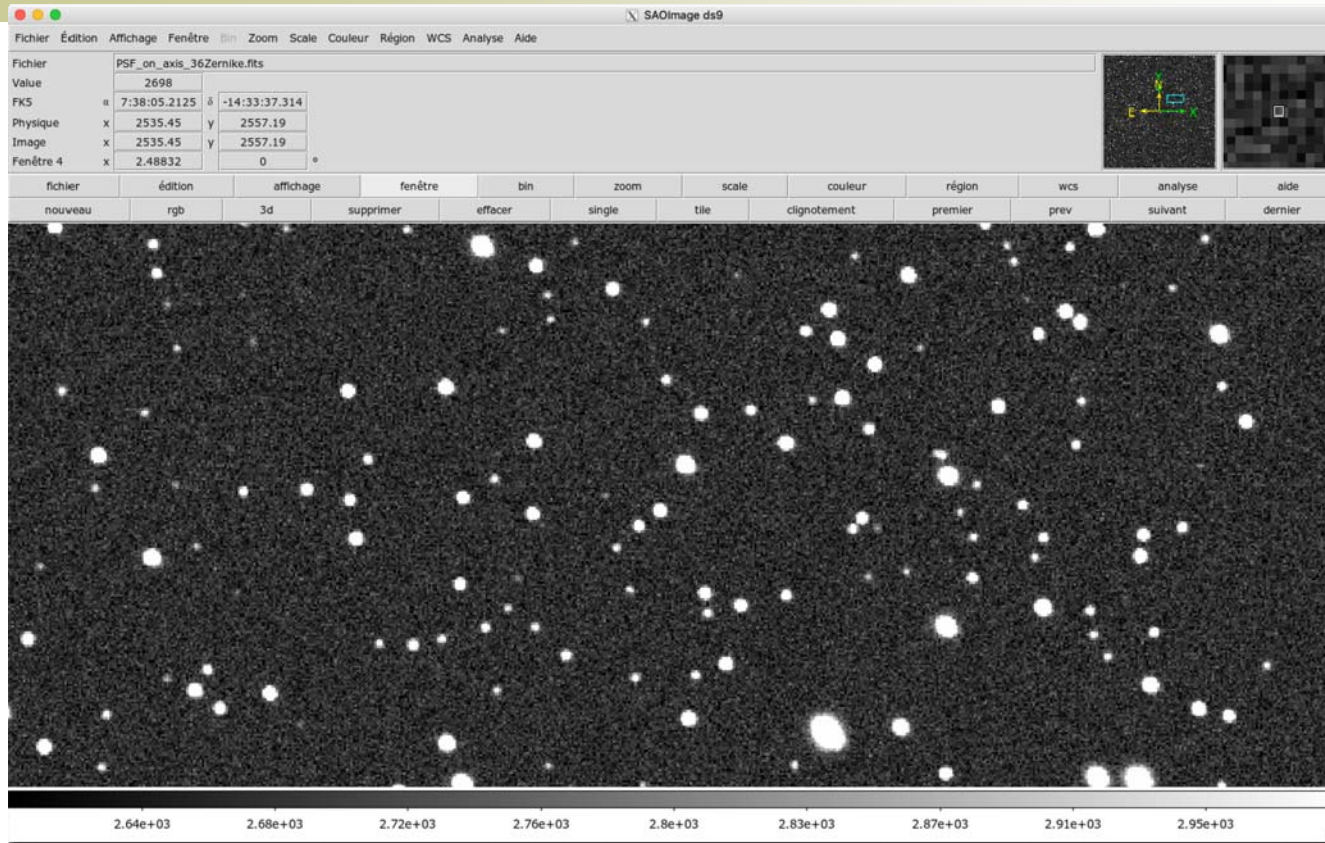


L'atmosphère fait baisser le pic toute en maintenant les ailes dont la taille est comparable avec la tache de seeing

# Effet sur la PSF: asymmetrie

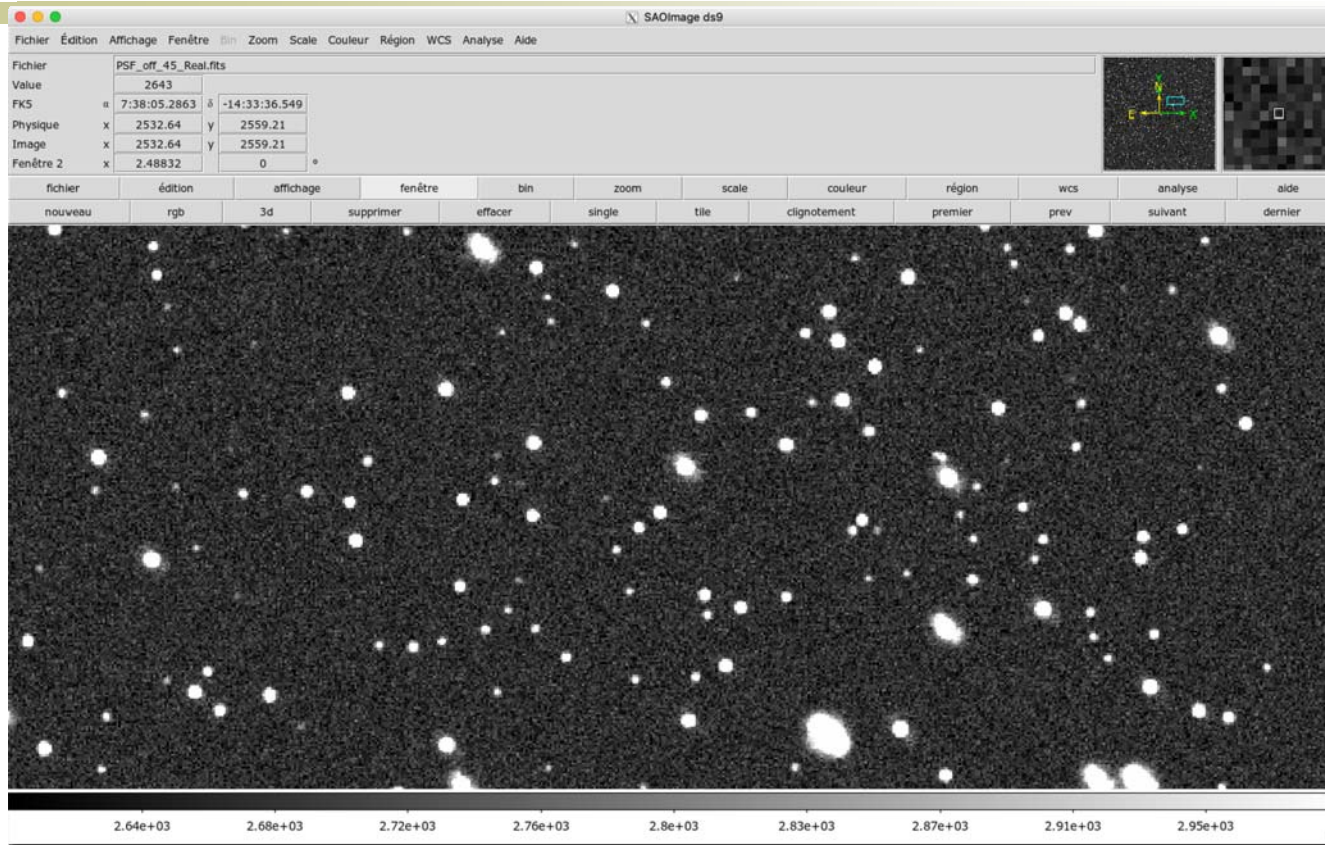


# [ Effet sur la science ]



Sans le défaut

# Effet sur la science



## Avec le défaut

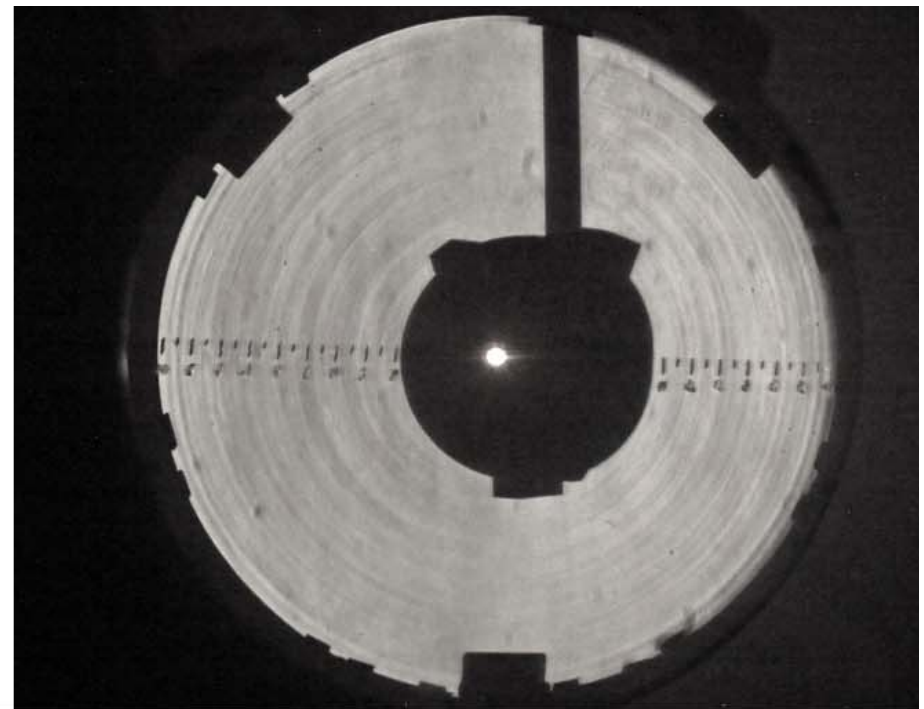
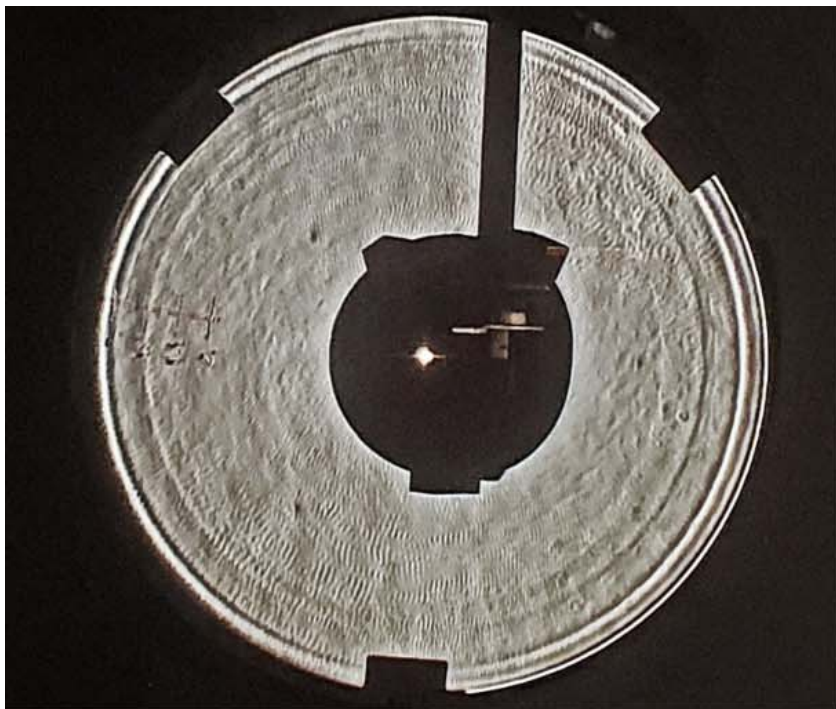
- L'asymétrie, orientée aléatoirement suivant l'époque d'observation, rend recherche de phénomènes transitoires par soustraction impossible.

# [ Solution



Petit coup de polissage classique

- On attend le verdict sur le ciel



# [ Conclusions ]

## Le polissage robotique est formidable

- Ouvre la voie à la réalisation de systèmes complexes et performants

## Mais il pose de vrais problèmes de spécification

- Analyse poussée au cas par cas est nécessaire
  - Connaissance des besoins scientifiques
  - Connaissance des méthodes de polissage
- La DSP représente une approche intéressante
  - Liaison avec la physique de l'imagerie
  - DSP -> « DSPP » -> « DSPS »
- Complexité de l'analyse des mesures demandés au fabricant
  - Impact important sur coût et délais

## Travail de standardisation manque

- ISO 10110 s'avère incomplet