



Optique Adaptative Multi-conjuguée pour l'observation terrestre

Nicolas Védrenne, Vincent Michau



retour sur innovation

Enjeux

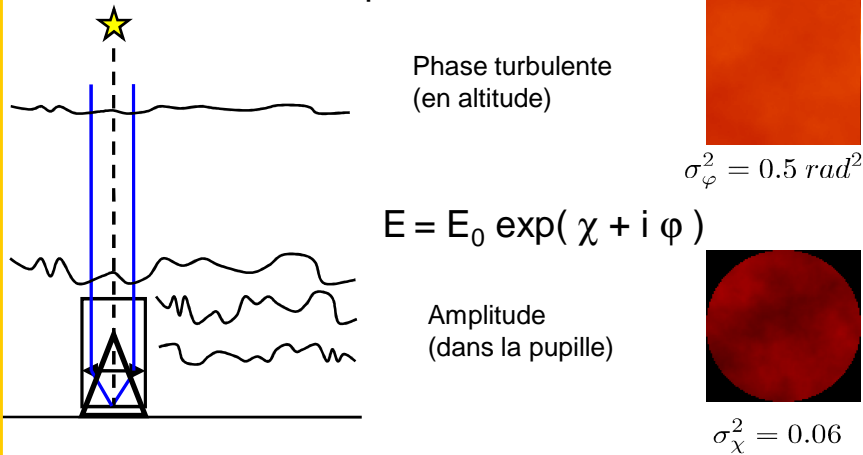
?



Fernando Alonso, Bahrein GP F1

La correction ?

Faibles perturbations



Fluctuations de phase **proches**

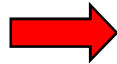
Approximation de **champ proche**

Linéarité perturbations ↔ mesure



Sans

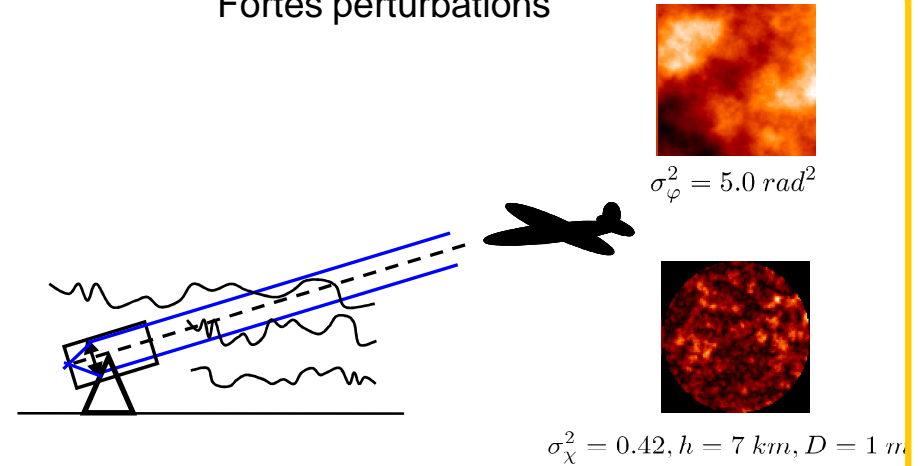
Optique
adaptative



Avec

$\lambda = 0.6 \mu\text{m}$; champ: 3,2 arcsec

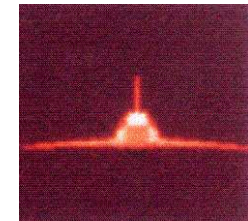
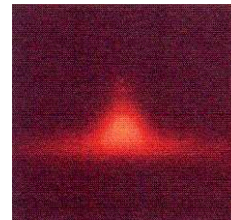
Fortes perturbations



Fluctuations de phase **distantes (qui se propagent)**

~~Approximation de **champ proche**~~

~~Linéarité perturbations ↔ mesure~~



$L = 20 \text{ km}, h = 200 \text{ m}, \text{envergure: } 10 \text{ m}, D = 50 \text{ cm}, \lambda = 4 \mu\text{m}$

Comment faire ?

Astronomie:

Limite: décorrélation angulaire

Observations terrestres:

turbulence + forte

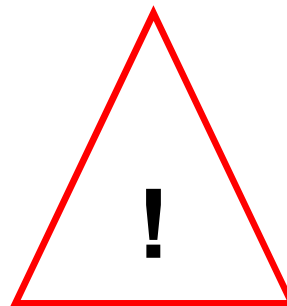
Limites:

décorrélation angulaire

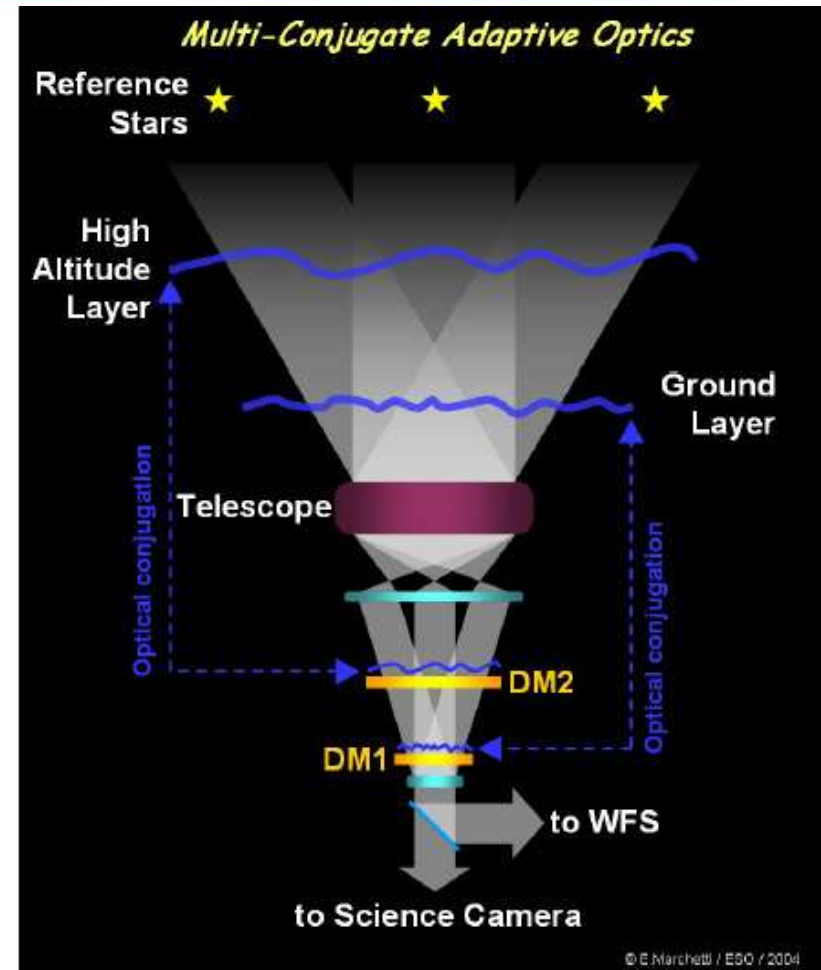
scintillation



Solution : **OAMC ?**



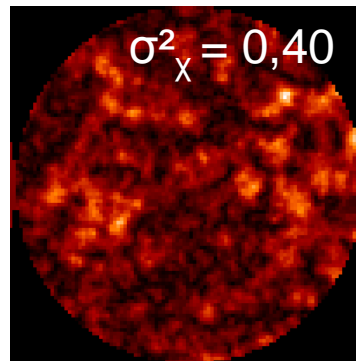
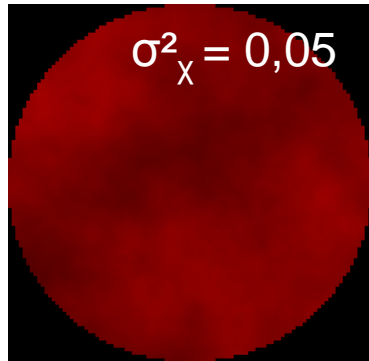
Effets diffractifs



Correction des couches distantes:
Optique adaptative multi-conjuguée (OAMC)

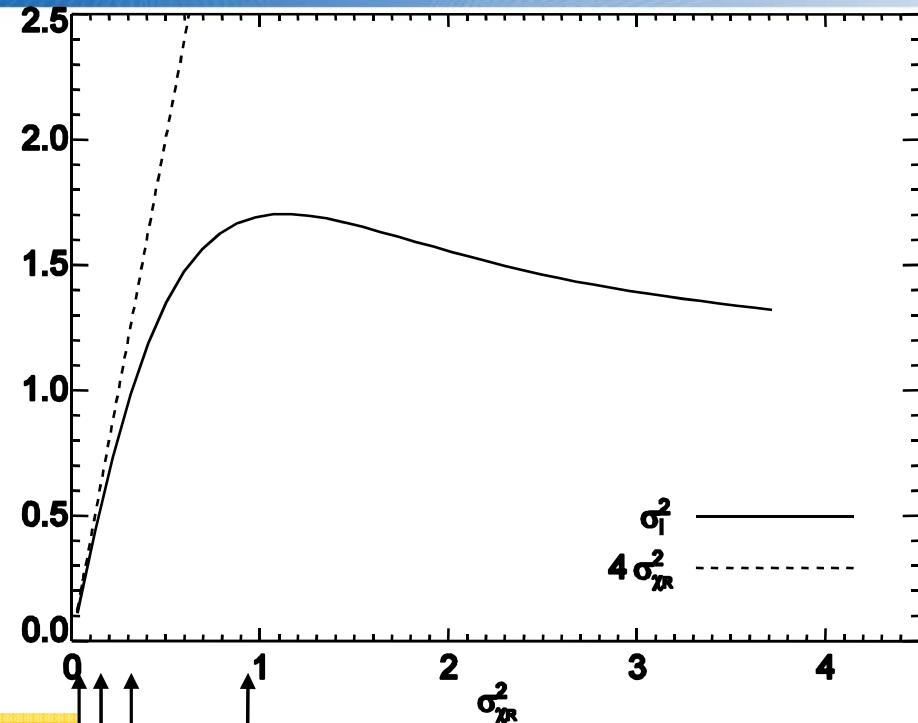
Propagation en forte turbulence

$$E = E_0 \exp(\chi + i \varphi)$$



Quantification analytique de σ_{χ}^2 :

➔ Approximation de Rytov ($\sigma_{\chi_R}^2$)



Modèle analytique

Champ proche

Faibles perturbations

Approximation de Rytov

Imagerie?

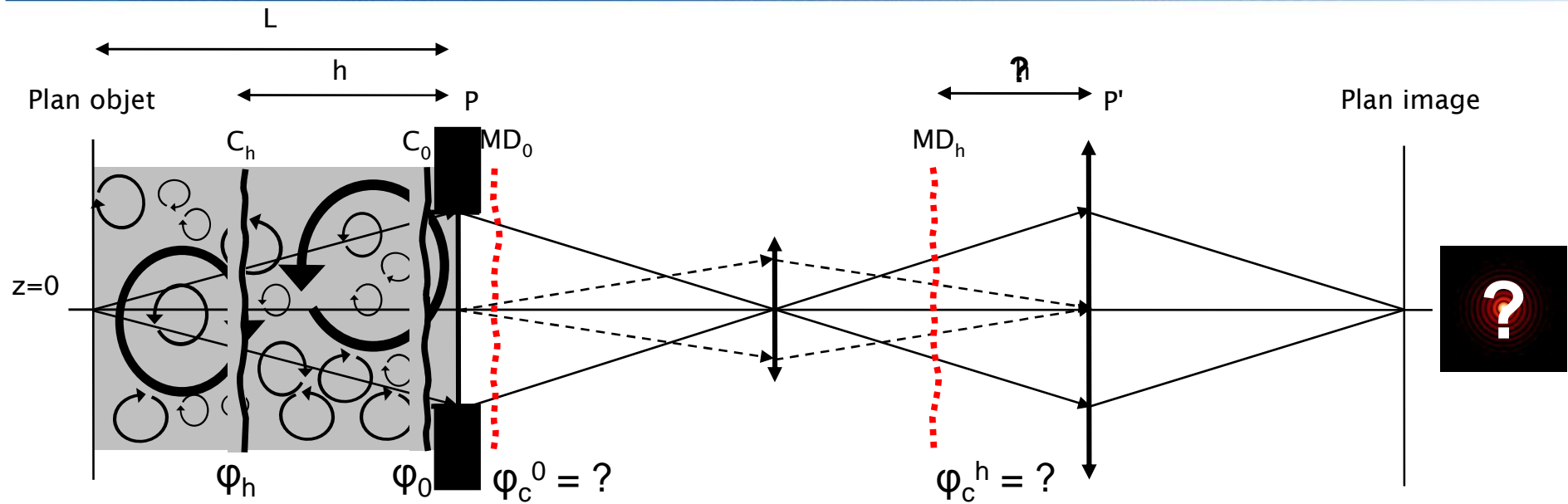
Saturation

Modèle numérique

L'OAMC en forte perturbation

- I. **Modèle**
- II. **Réponse impulsionnelle**
- III. **Cas de la correction partielle**

Modèle à 2 couches



Correction "parfaite" : $\varphi_c^0 = -\varphi_0$

$\varphi_c^h = -\varphi_h$



Pupille finie
(champ tronqué)

L'OAMC en forte perturbation

- I. Modèle
- II. Réponse impulsionnelle**
- III. Cas de la correction partielle

Réponse impulsionnelle: courtes poses

σ_x^2

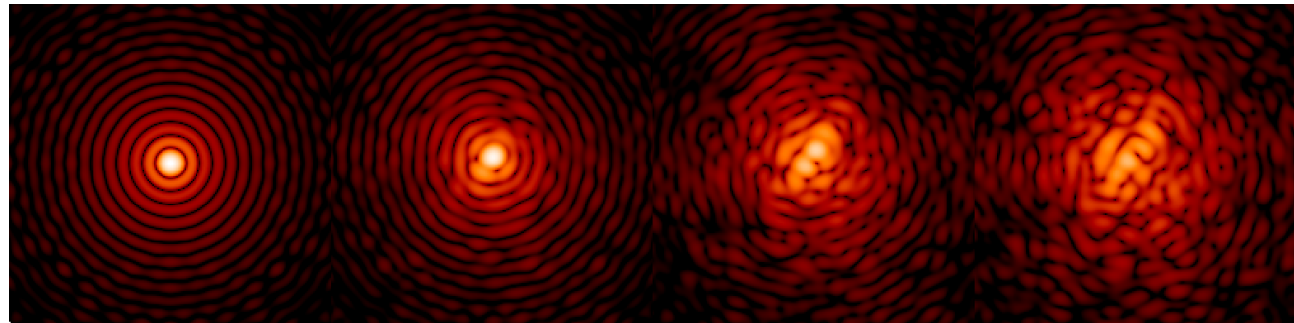
0,00

0,05

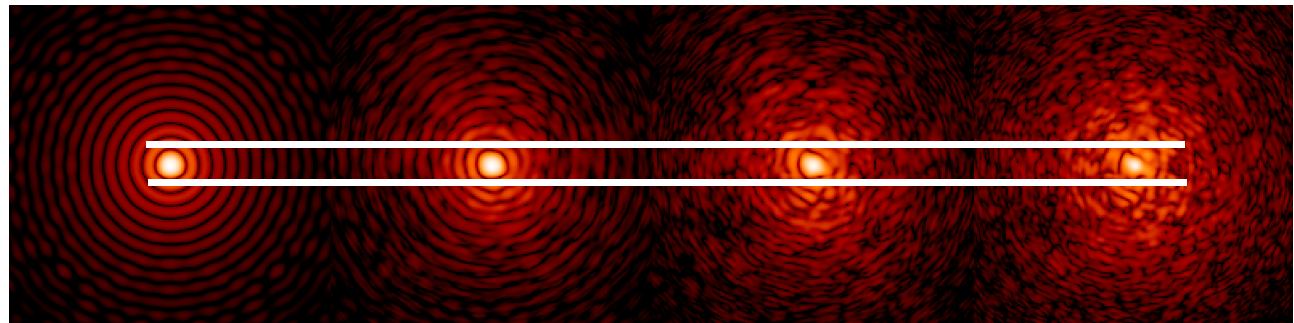
0,25

0,60

Sans correction
en altitude
(correction
parfaite de C_0)



Avec correction au
sol **et** en altitude



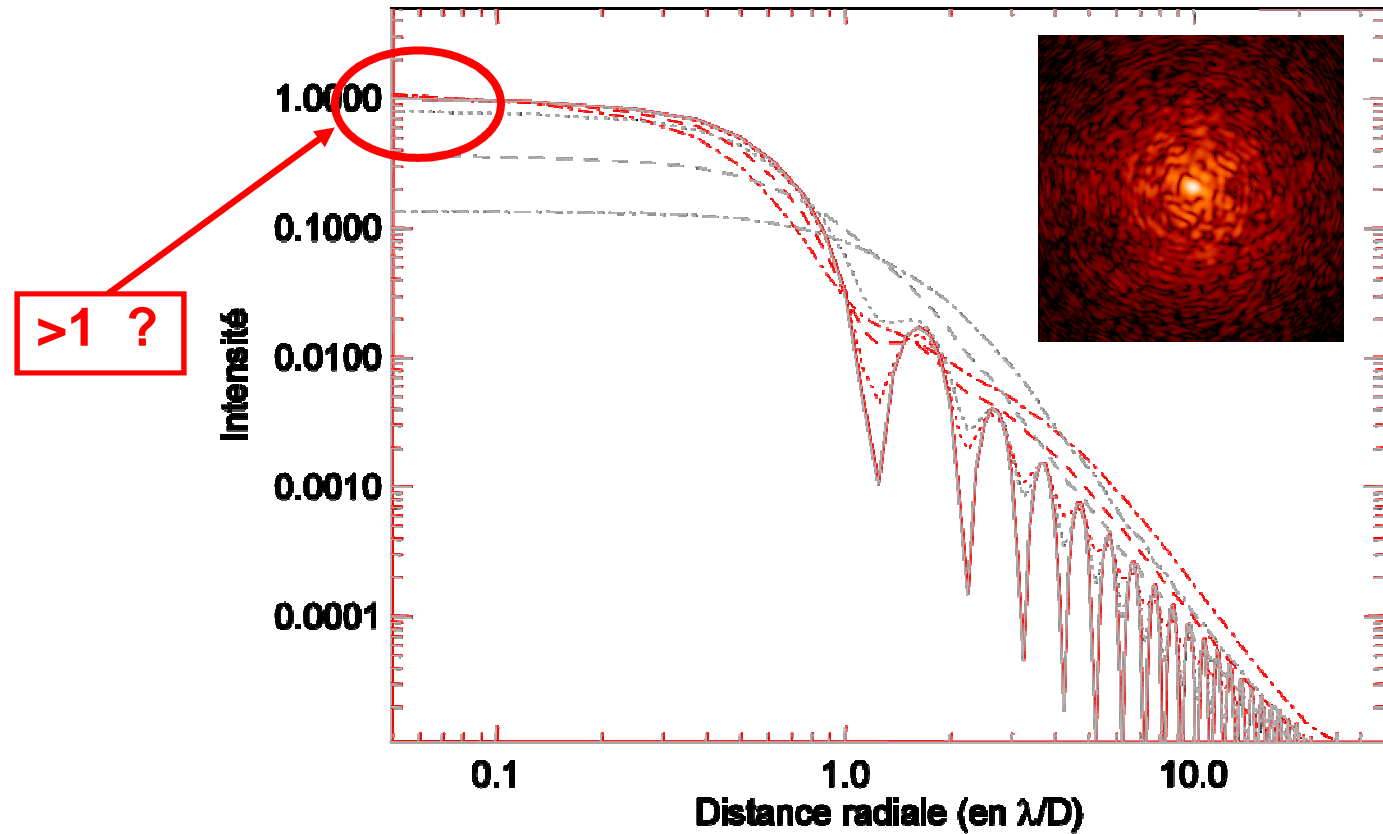
Speckles (correction parfaite ?!) + pic fin

Réponse impulsionnelle longue pose

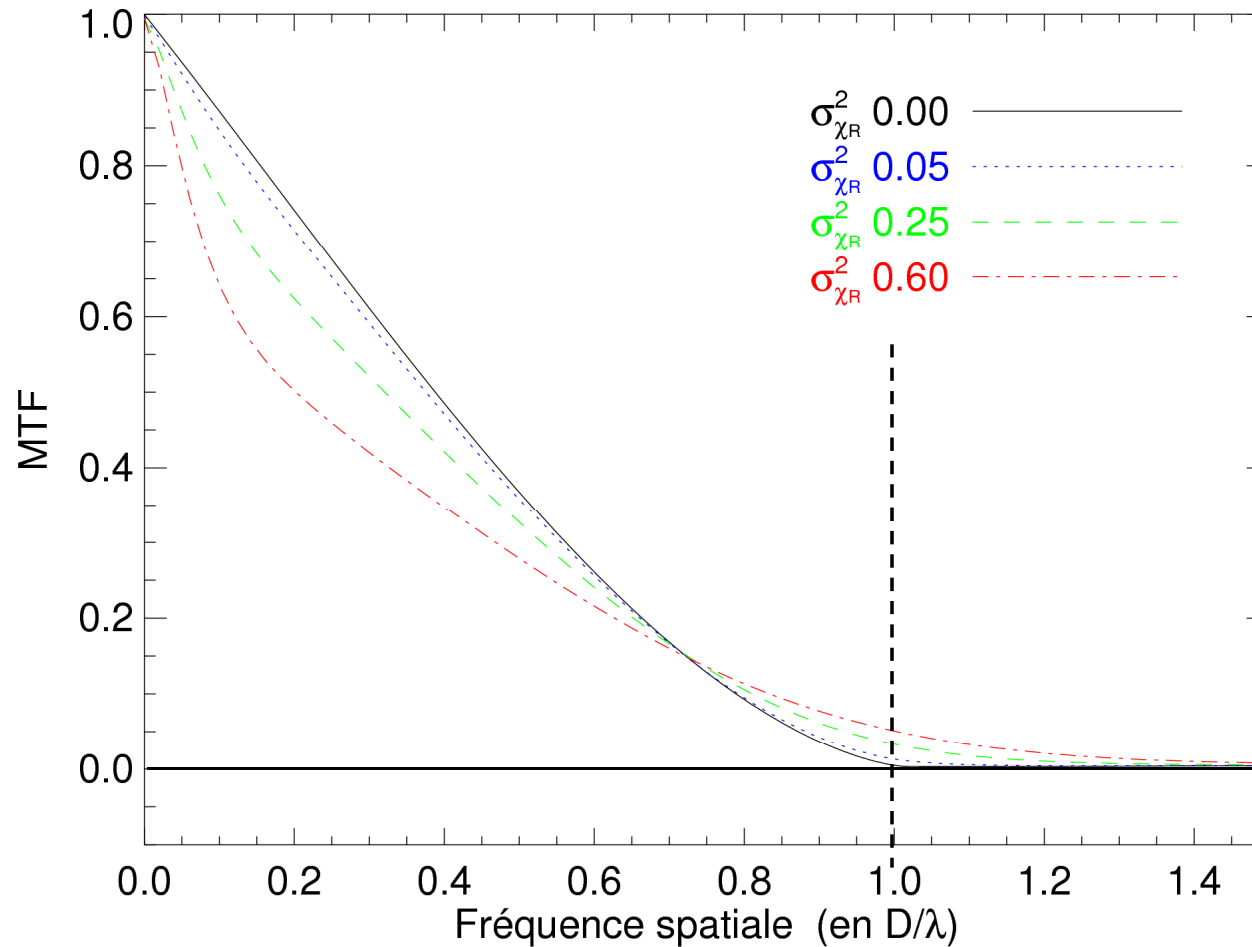
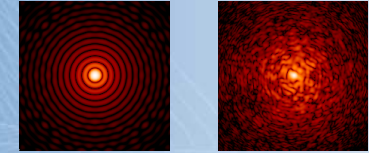
σ_{R}^2 0.00 ———
 σ_{R}^2 0.05 ·····
 σ_{R}^2 0.25 - - -
 σ_{R}^2 0.60 - - -

Sans correction

Avec correction

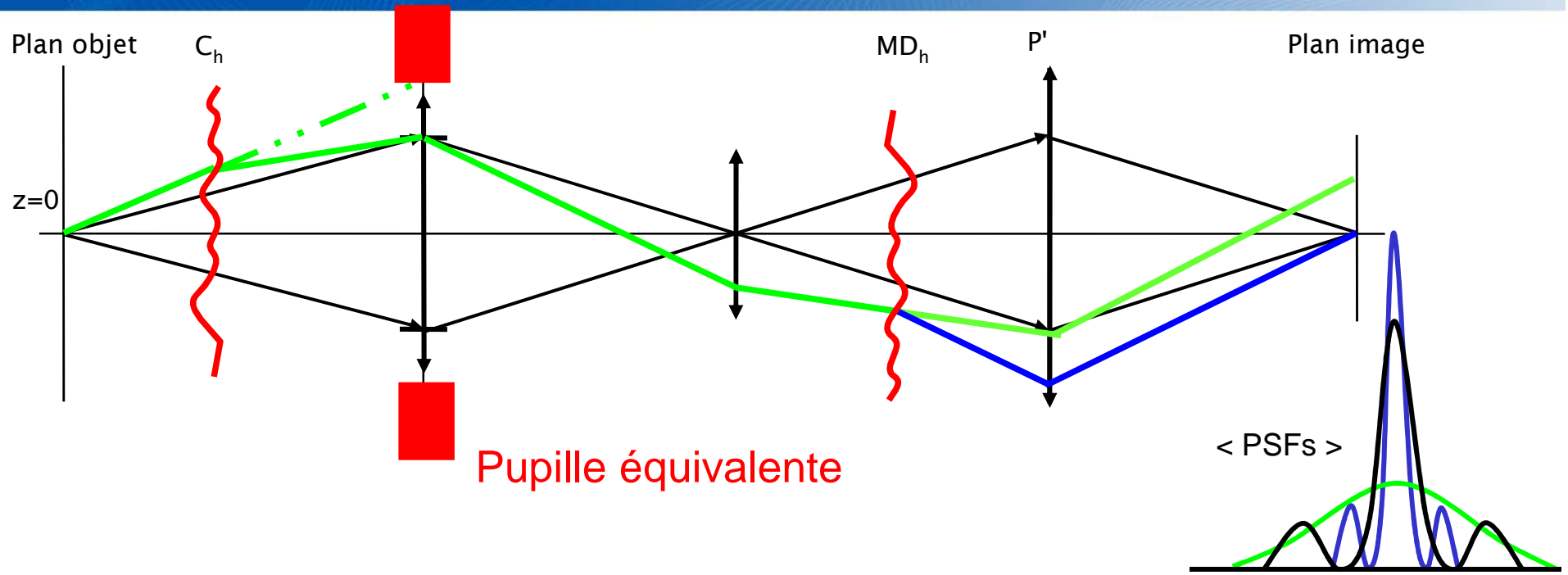
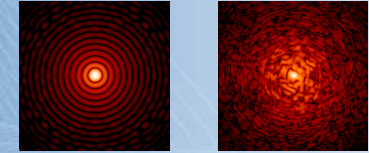


Fonction de transfert longue pose



OAMC + Pupille + effets diffractifs = Super résolution !

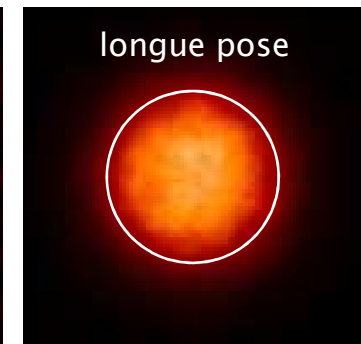
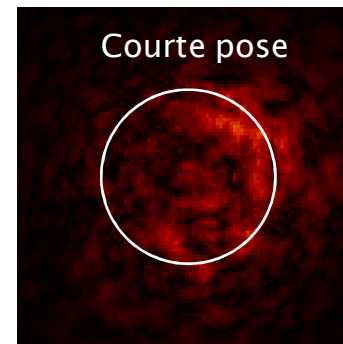
Pourquoi ?



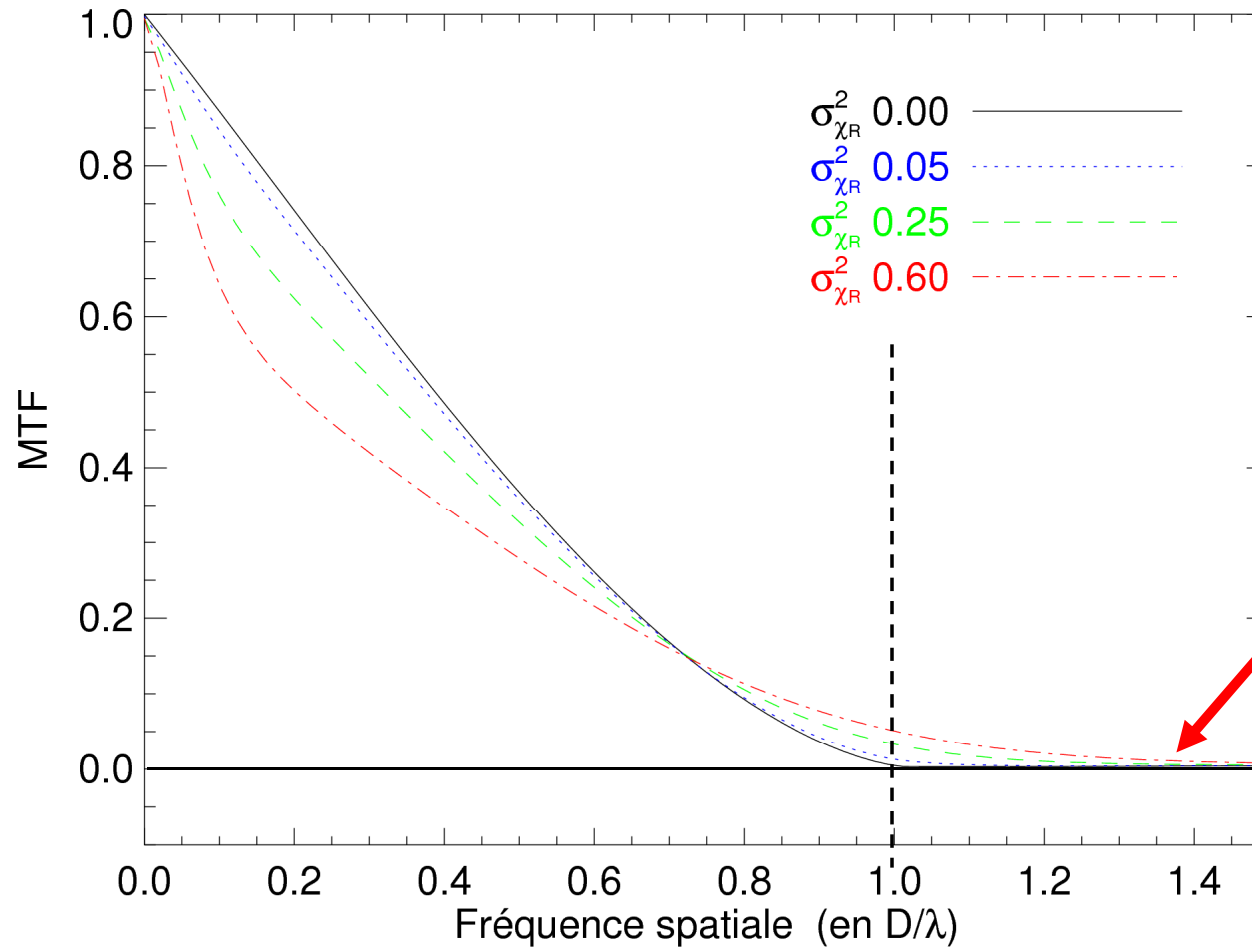
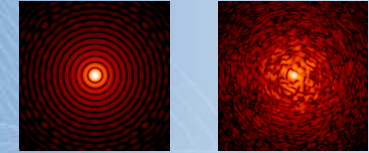
Chemin optique sans turbulence **sans correction** avec correction

Amplitude en P'

➔ « lentille atmosphérique » !



Fonction de transfert longue pose

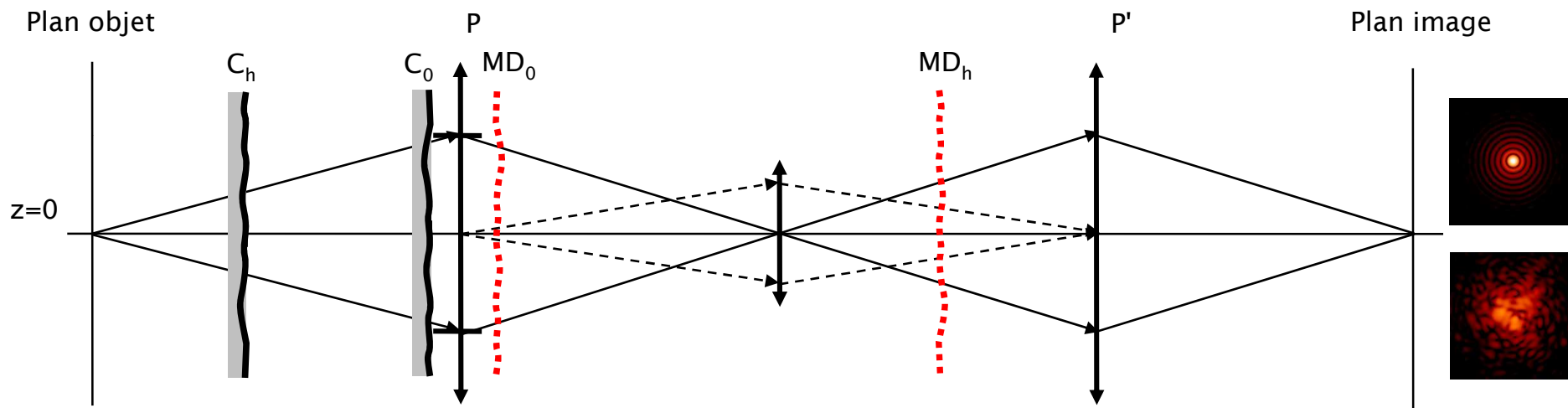


Effet de lentille atmosphérique


L'OAMC en forte perturbation

- I. Modèle
- II. Réponse impulsionnelle
- III. **Cas de la correction partielle**

Caractérisation de l'efficacité de la correction



$$SR = \frac{\text{Image (0,0)}}{\text{Pupille (0,0)}}$$


SR = f (flux pupille)

$$I_T = \frac{\text{flux pupille}}{\langle \text{flux pupille} \rangle}$$



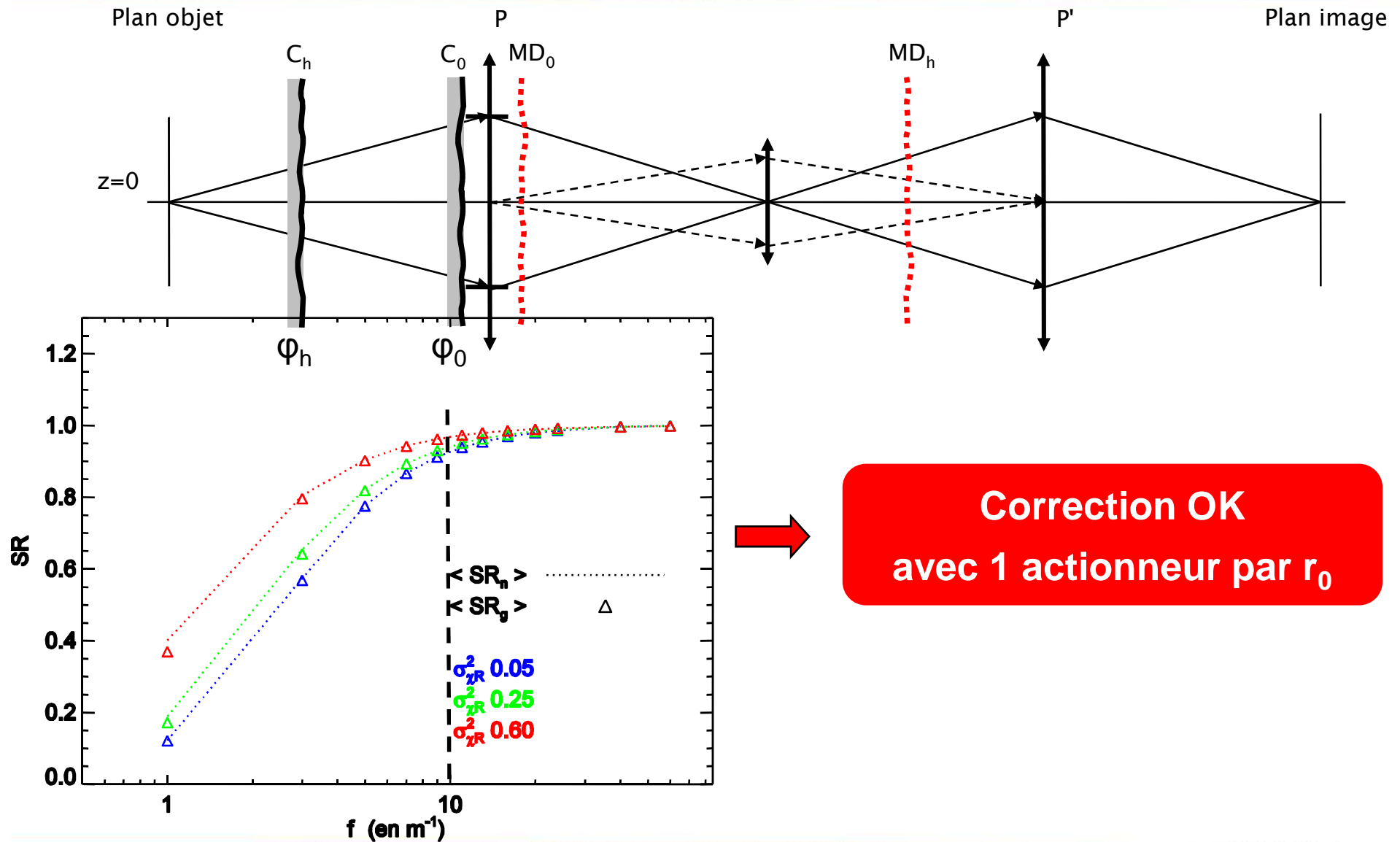
Définitions

$$SR_n = \frac{SR}{I_T}$$

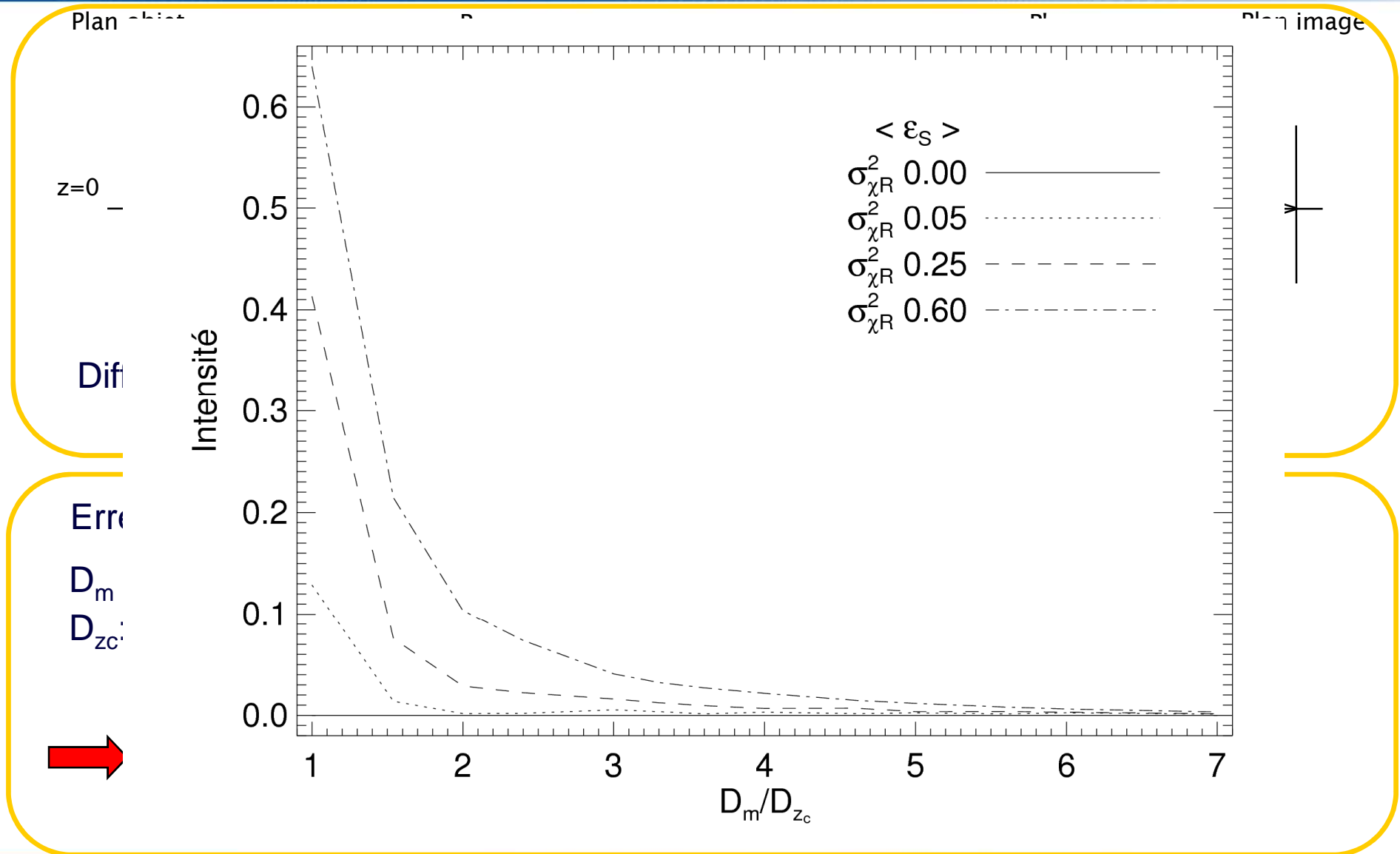
SR_g : champ proche

$$\langle SR_n \rangle ? \langle SR_g \rangle$$

Effet d'une correction partielle par le miroir déformable dans la pupille



Taille du miroir déformable



Conclusions et perspectives: OAMC

Correction

PSF : effet de "lentille atmosphérique"


Proposition de modèles pour:

- Pic cohérent
- Décorrélation angulaire du SR

Règles de dimensionnement classiques valables sauf :

Taille du DM en altitude > taille géométrique

Correction satisfaisante

 À tester pour plus de 2 miroirs et volume continu

ASO + Commande (résultats non présentés ici)

Fonctionnement étudié en boucles ouverte et fermée

Commande itérative proposée

 Mesure de front d'onde multi-directionnelle pour les perturbations fortes ?

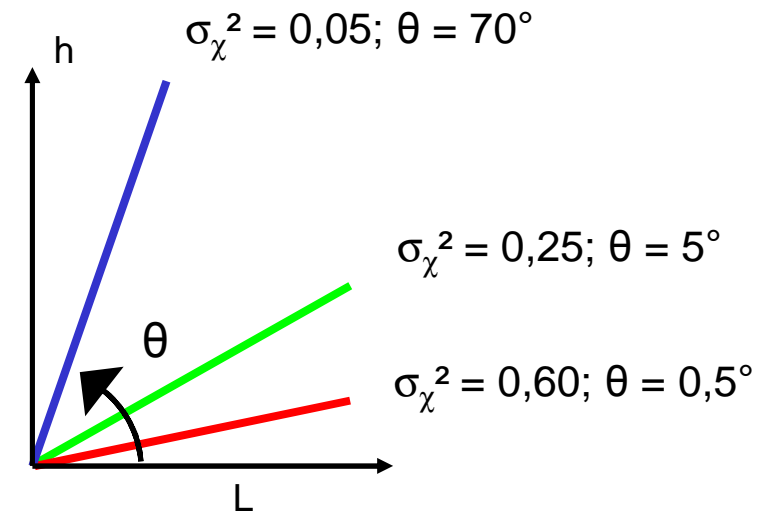
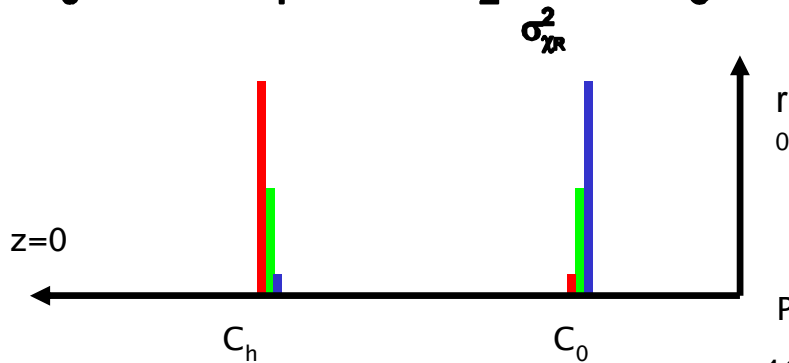
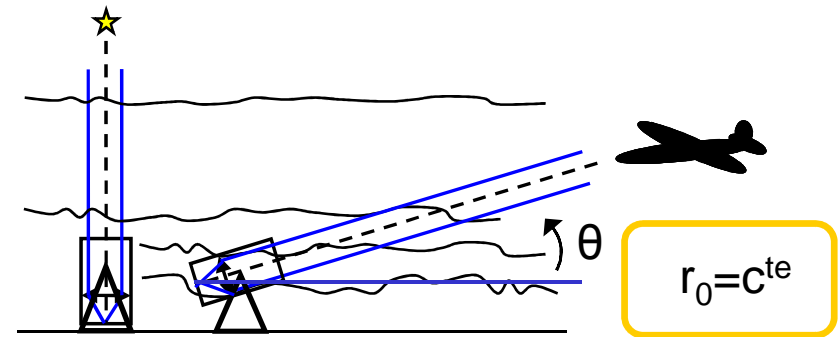
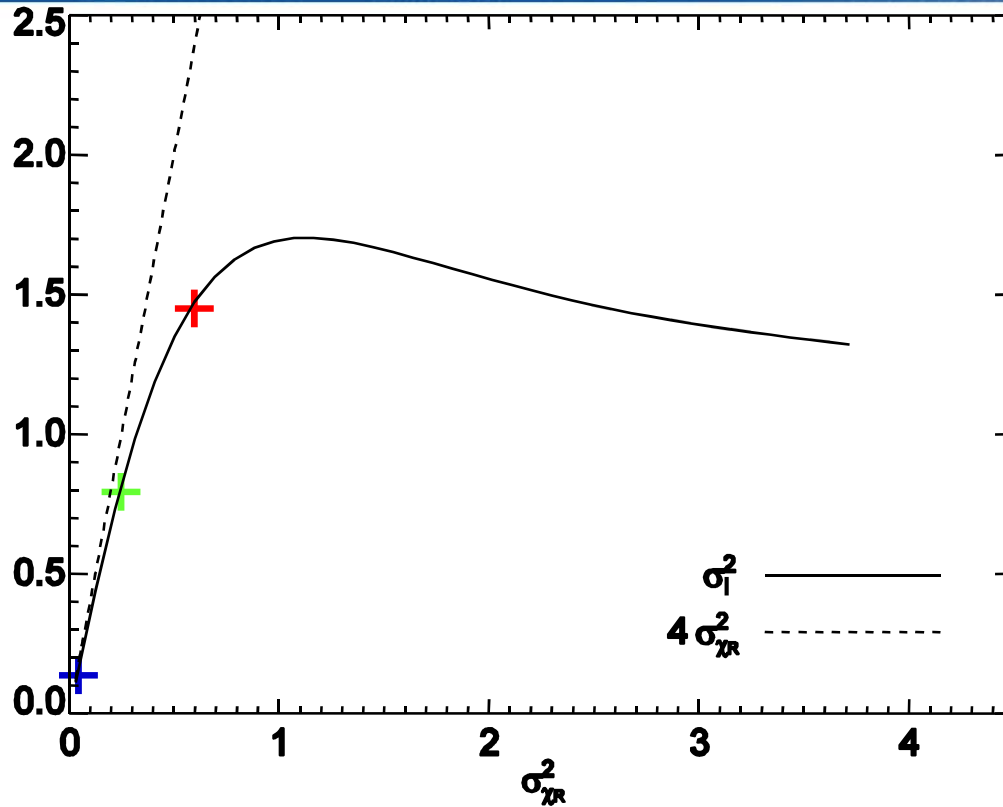
 Validation expérimentale avec le banc INCA



Fernando Alonso, Bahrein GP F1

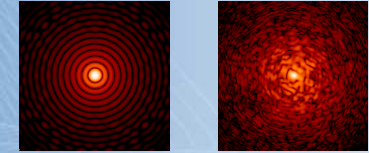
Merci de votre attention

Force des perturbations

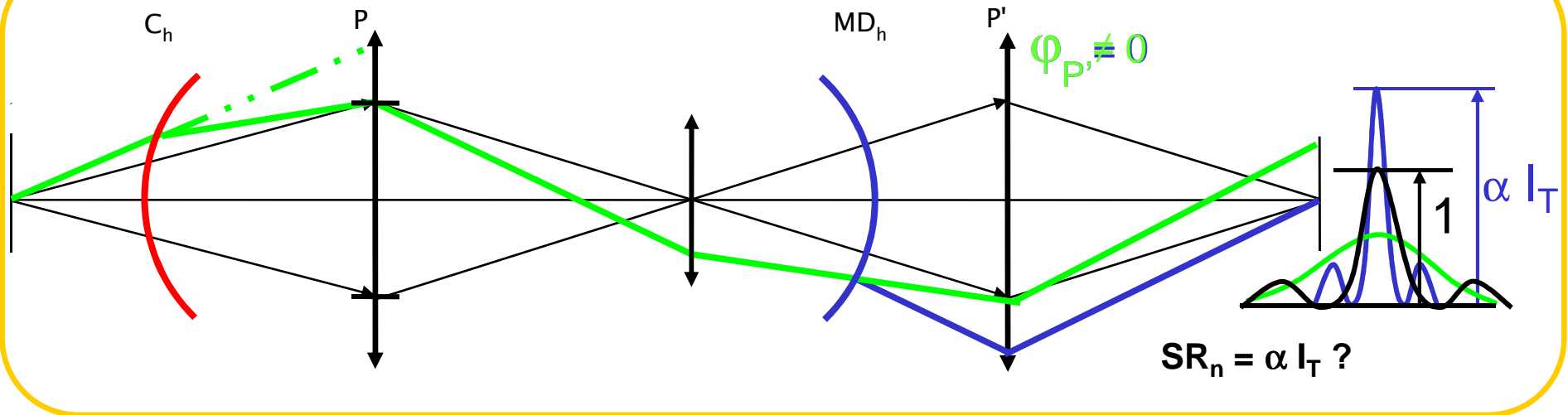


$r_0 = 10 \text{ cm @ } 4 \mu\text{m}, L = 20 \text{ km}, D = 0.5 \text{ m}$

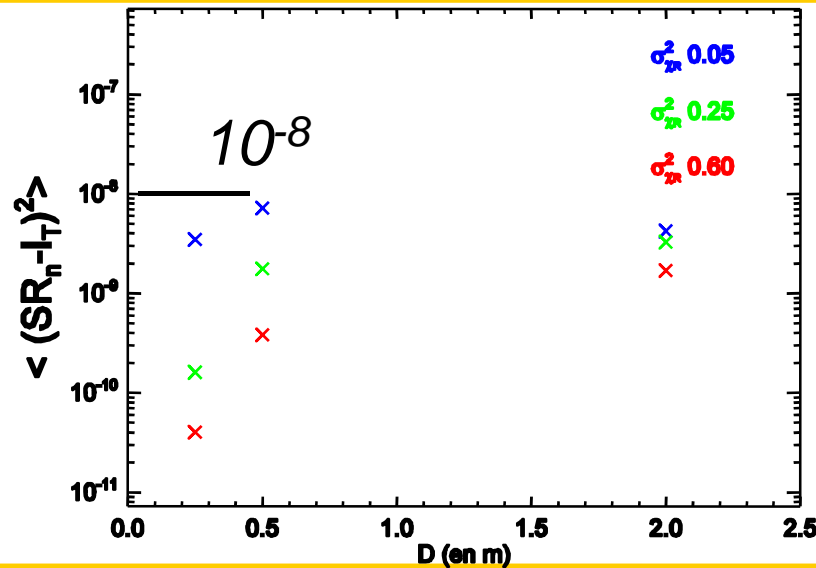
Rapport de Strehl normalisé: SR_n



Interprétation géométrique (exemple d'une courbure)

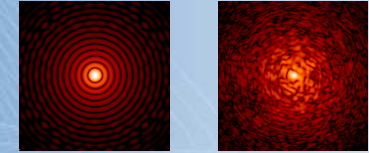


Modélisation
PILOT



$$SR_n = I_T !$$

Rapport de Strehl: SR



$$SR = I_T^2$$

Dont il existe une quantification analytique des moments en faibles perturbations



Règles simples pour estimer les moments de SR

$$\langle SR_n \rangle = \langle I_T \rangle = 1 \text{ (conservation de l'énergie)}$$

$$\langle SR \rangle = \langle SR_n \rangle^2 + \sigma_{I_T}^2$$

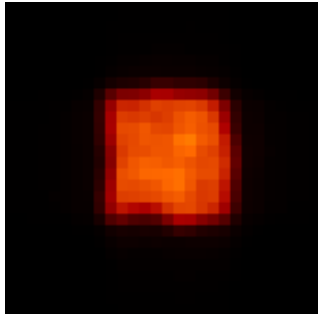
$\sigma_{I_T}^2$	$D_P = 0,25 \text{ m}$	Terrestre	Solaire
		0,5 m	2 m
$\sigma_{\chi_R}^2 = 0,05$	0,05	0,01	0,0005
$\sigma_{\chi_R}^2 = 0,25$	0,15	0,05	0,003
$\sigma_{\chi_R}^2 = 0,60$	0,20	0,08	0,006



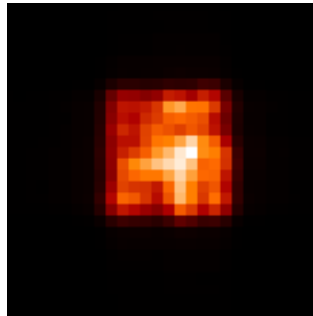
SR pouvant être significativement plus grand que 1

Corrélation dans le champ

Sans OAMC



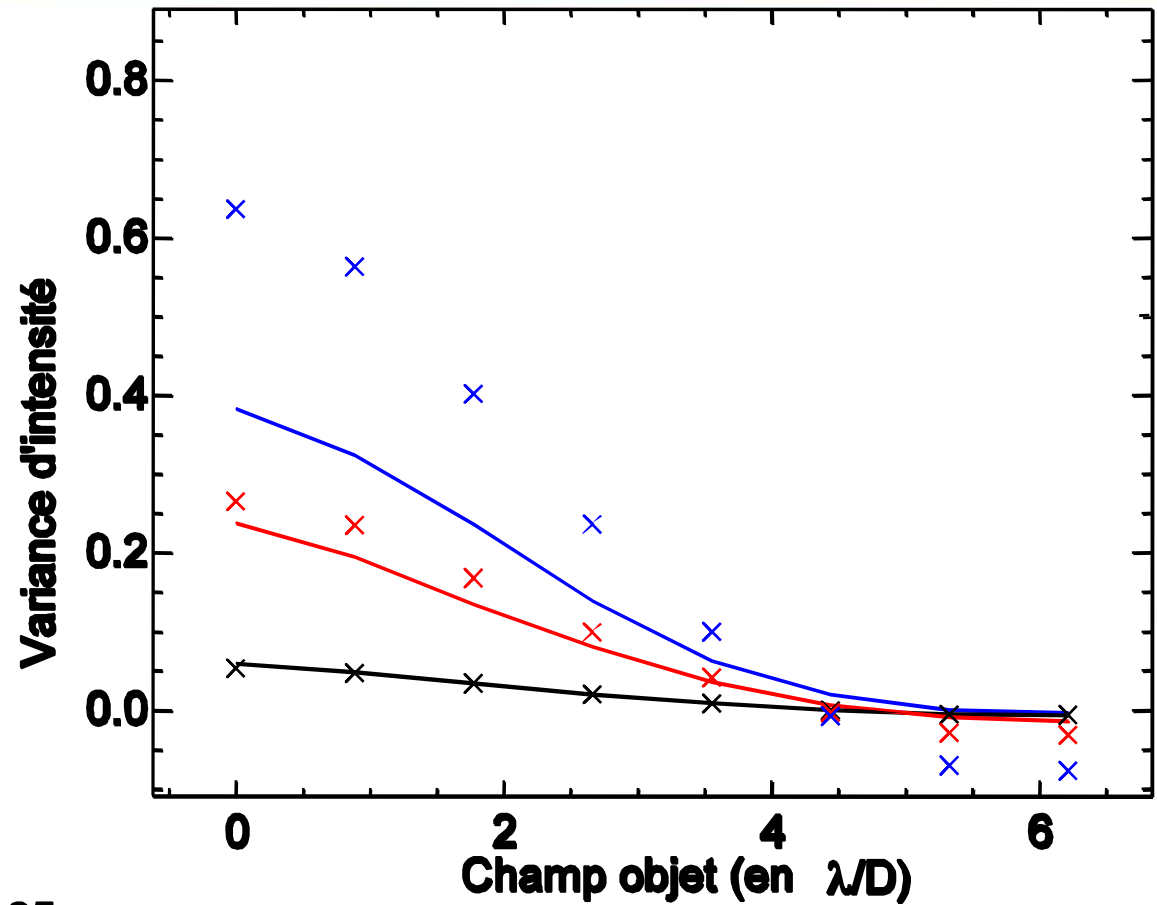
Après OAMC



carré 4 m, L=20 km, D = 10 cm, $r_0=7$ cm, $\sigma_x^2=0,4$

Déjà observé sur le Soleil
(O. von der Lühe)

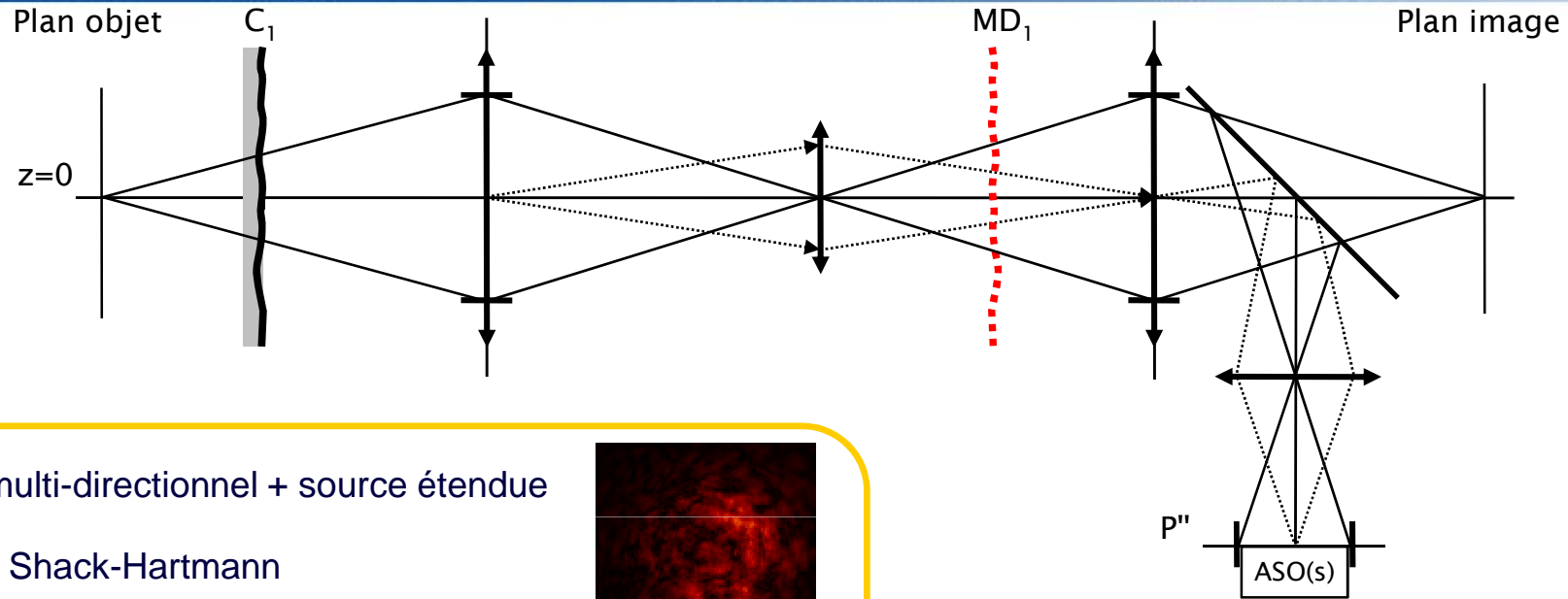
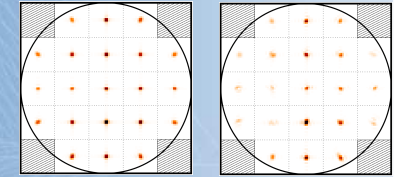
$$C_{SR} = \langle SR(\alpha) SR(\alpha+\beta) \rangle$$



—	C_{SR}	σ_{xR}^2 0.05
×	C_{SR} analytique	σ_{xR}^2 0.25
		σ_{xR}^2 0.60

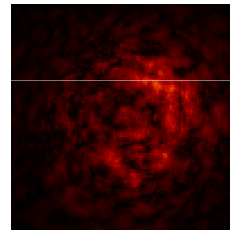
Quantification analytique

Mise en œuvre : ASO ?

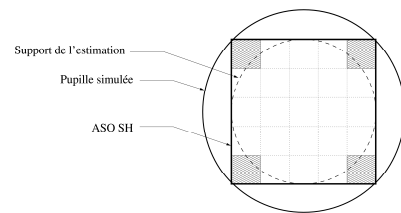


ASO: multi-directionnel + source étendue

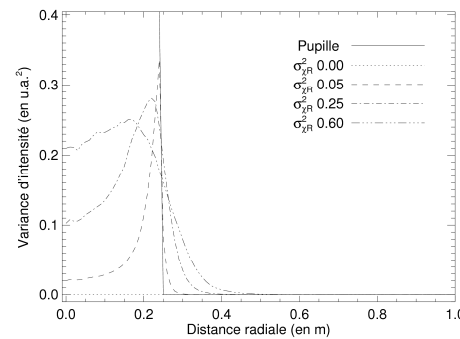
➔ Shack-Hartmann



Scintillation résiduelle (en BF):

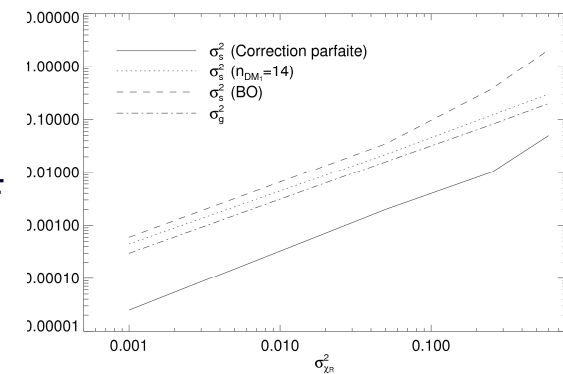


Dimensionnement adapté !

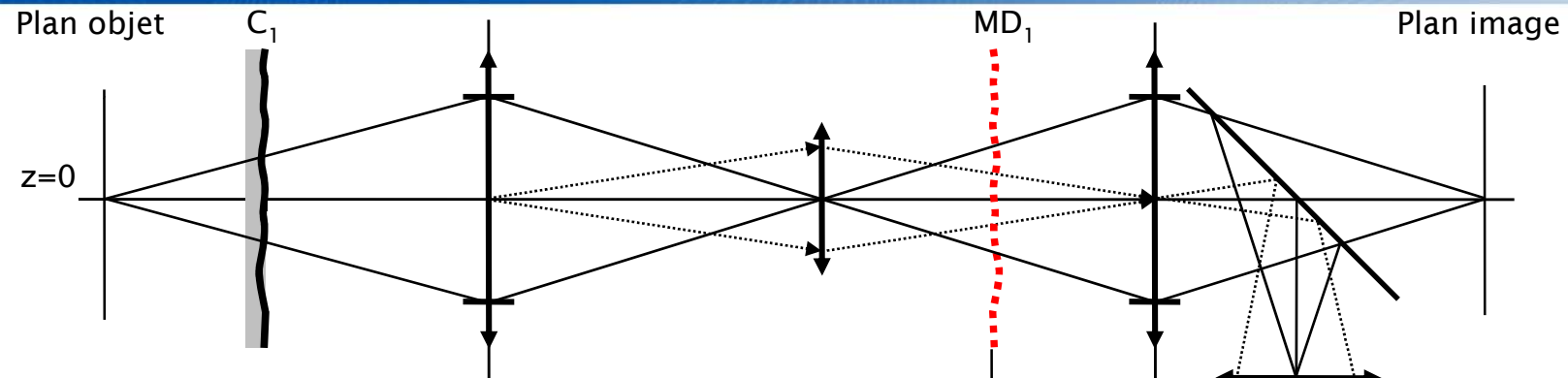


Effet de la scintillation sur l'ASO: $\epsilon_s = \phi_g - \phi_d$

ϵ_s en BF



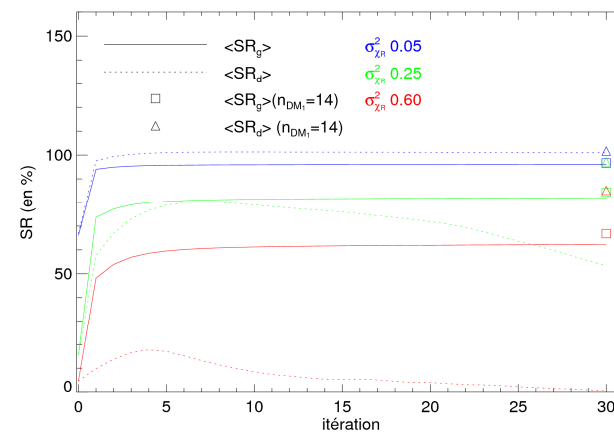
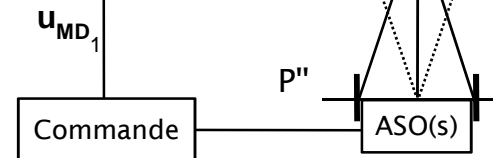
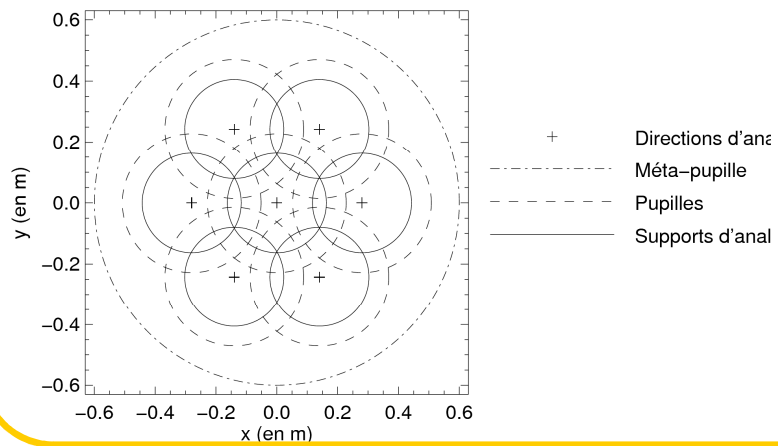
Commande ?



ε_s en BF ➔ Approche itérative

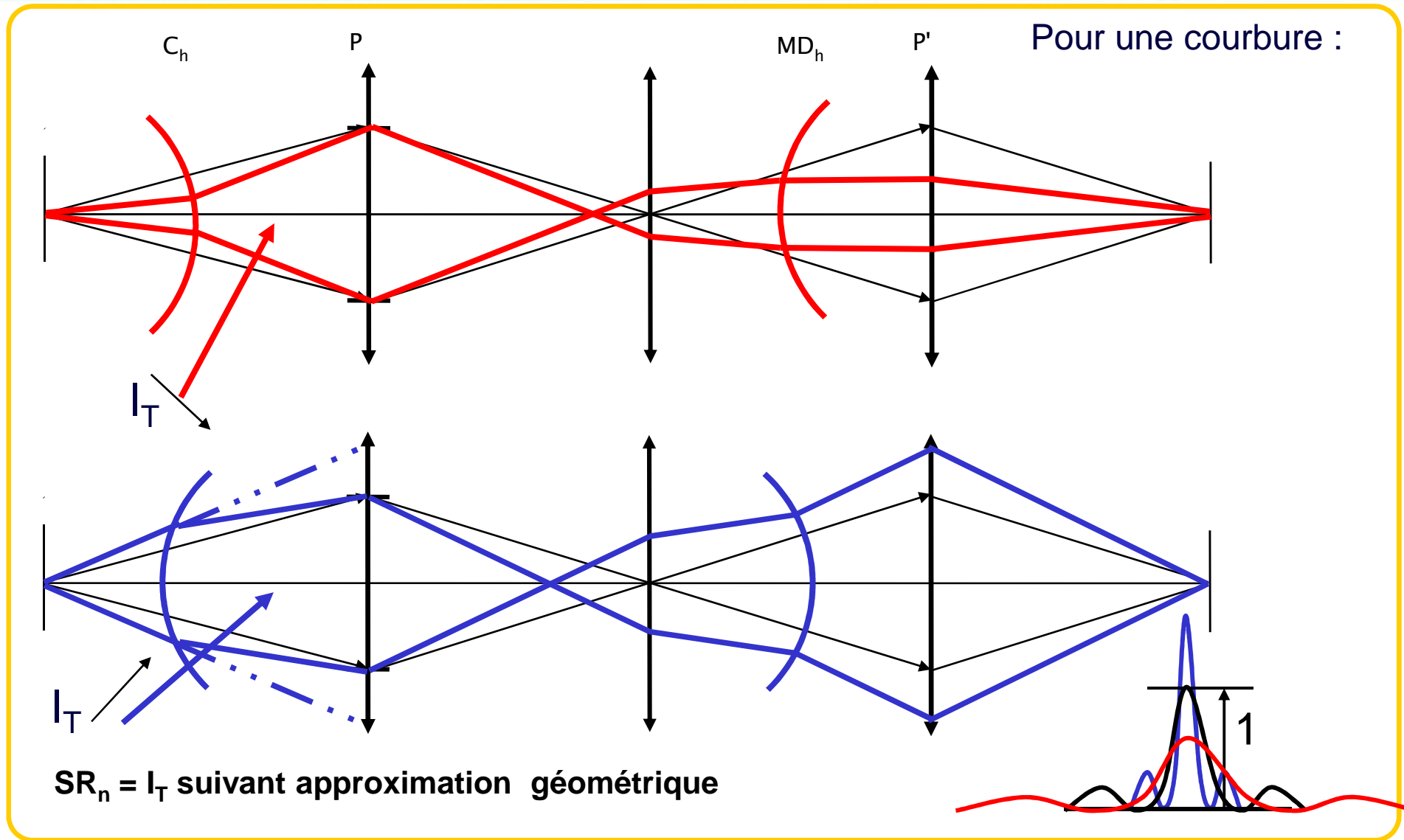
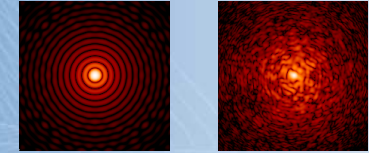
+
Commande optimale (champ proche, Fusco et al.)

+
support d'estimation étendu



Approche
Itérative
OK
(limite Rytov)

SR_n: cas d'une courbure inverse



SR_n: cas d'une courbure inverse

