

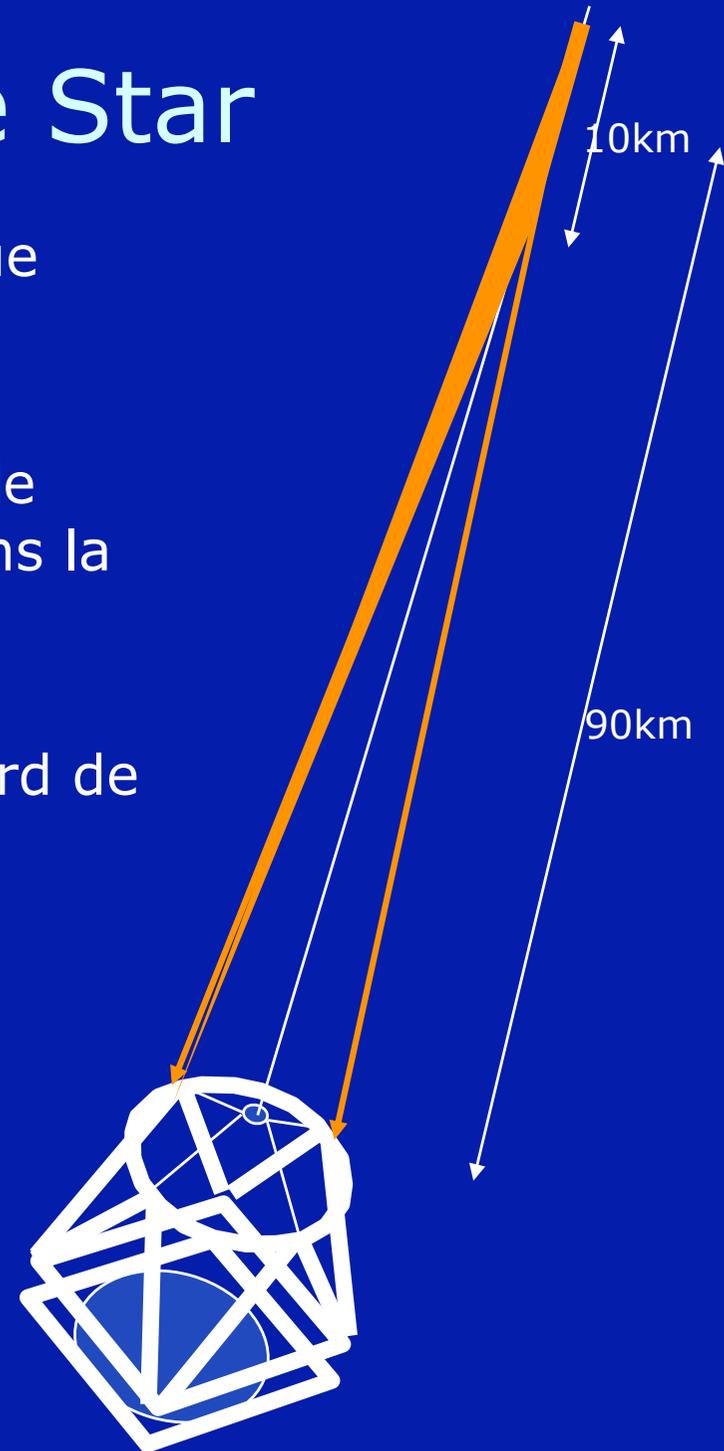
Un senseur à dérivée optique pour l'analyse de front d'onde avec étoile laser sur ELT

E. Gendron, M. Brangier, F. Vidal, Z. Hubert, G. Rousset, F. Pouplard

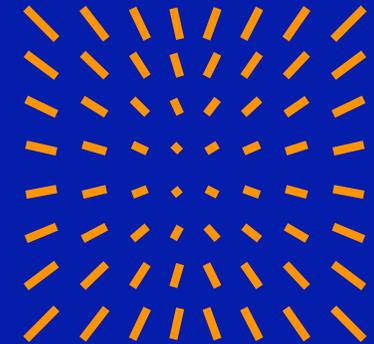
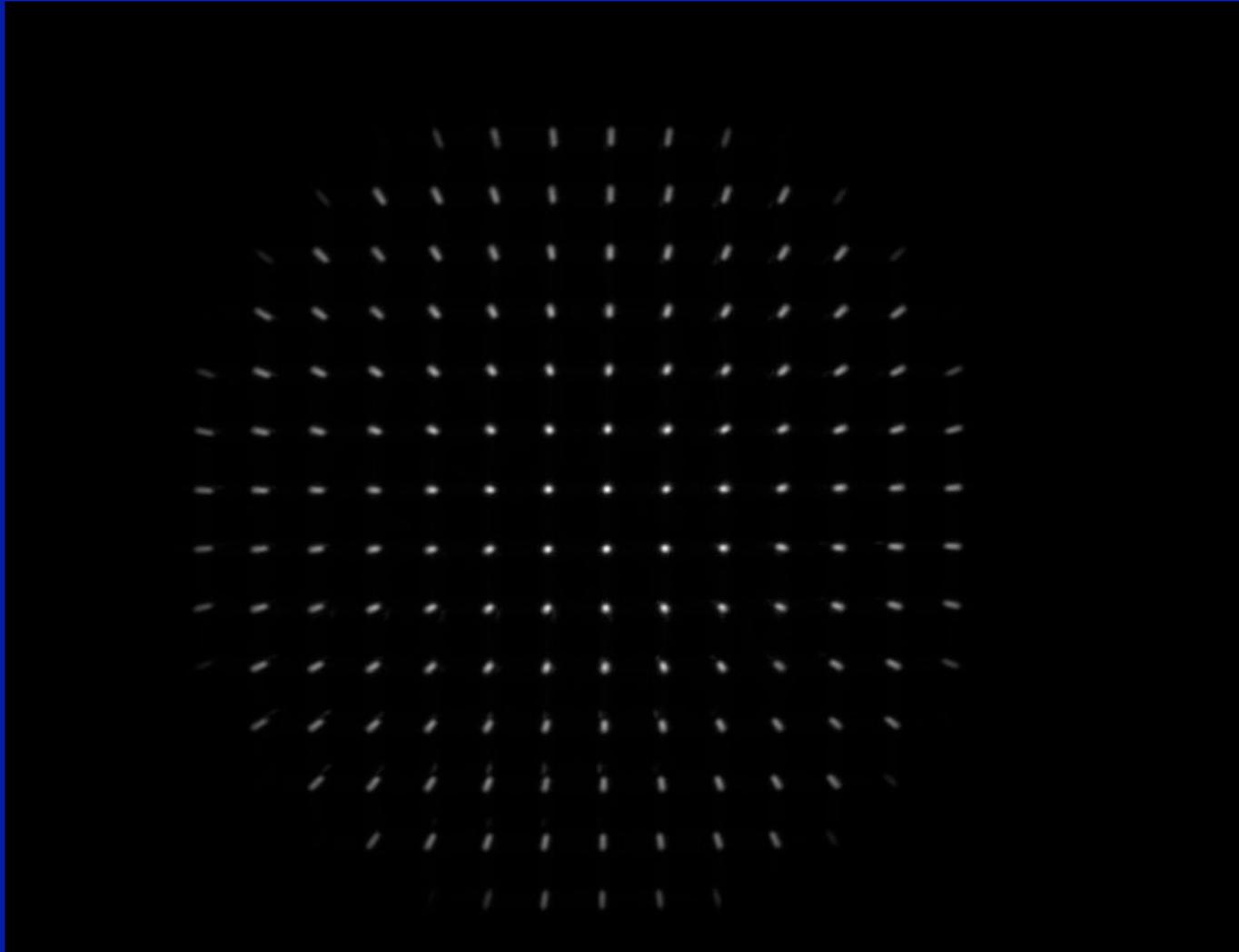
Observatoire de Paris

Laser Guide Star

- Couche de Sodium atmosphérique entre 85 et 95km
- Laser à 589 nm au sol (derrière le miroir secondaire) et focalisé dans la couche de sodium
- La source est étendue vue du bord de la pupille



Wavefront sensor requirements



- Spots allongés : le calcul du centre de gravité est difficile (algorithmes spécifiques)

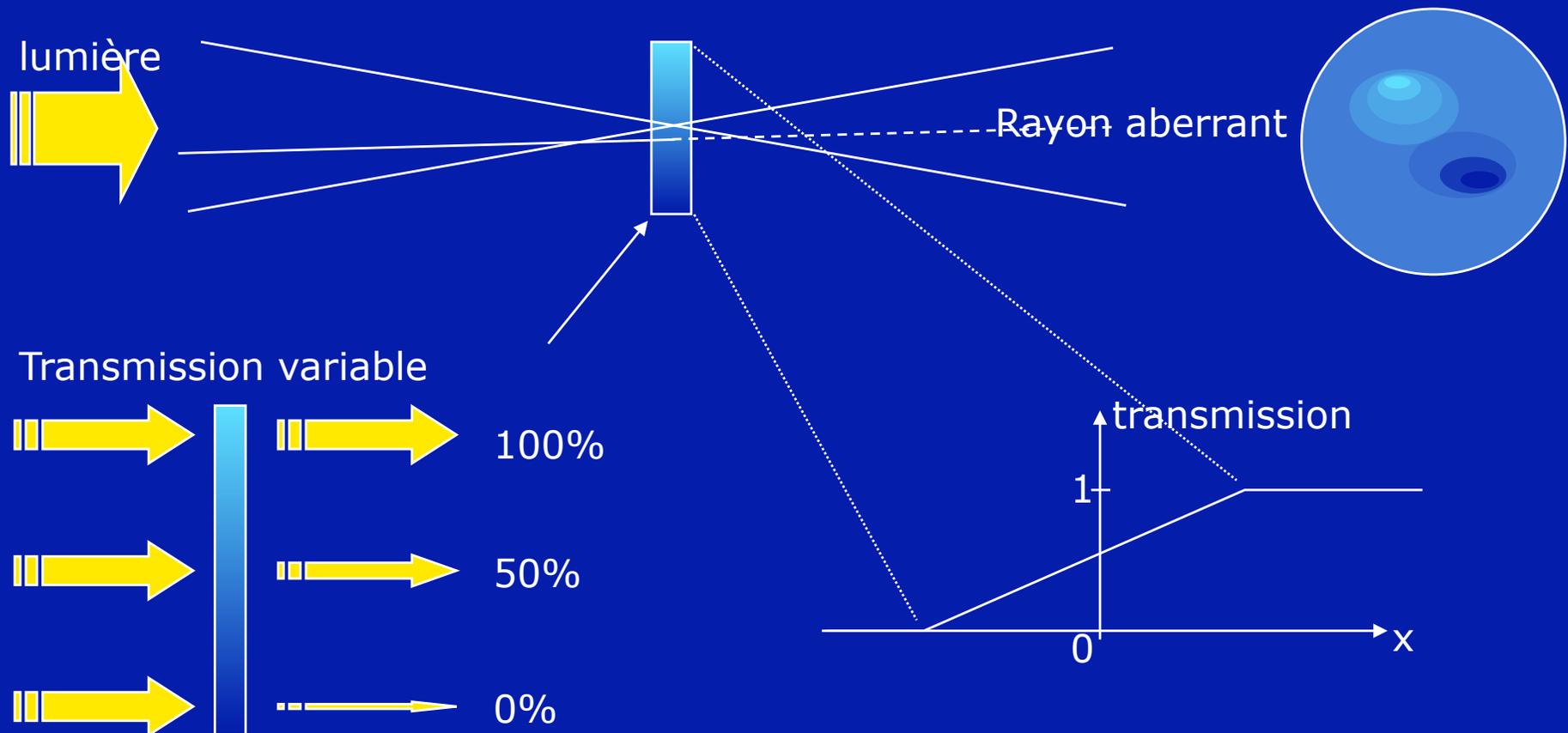
Optique Adaptative en boucle ouverte sur étoile artificielle

On a besoin d'un analyseur :

- Linéaire
- Gain constant
- Possédant une grande dynamique
- Pouvant travailler sur une source étendue
- Nécessitant un minimum de pixels
- A faible bruit

ASO à dérivée optique ?

- Analyseur de front d'onde à dérivée optique



ASO à dérivée optique

- Approche par transformée de Fourier

$$f(x) \xrightarrow{\text{TF}} F(k)$$

$$2i\pi x f(x) \xrightarrow{\quad} \frac{dF}{dk}$$

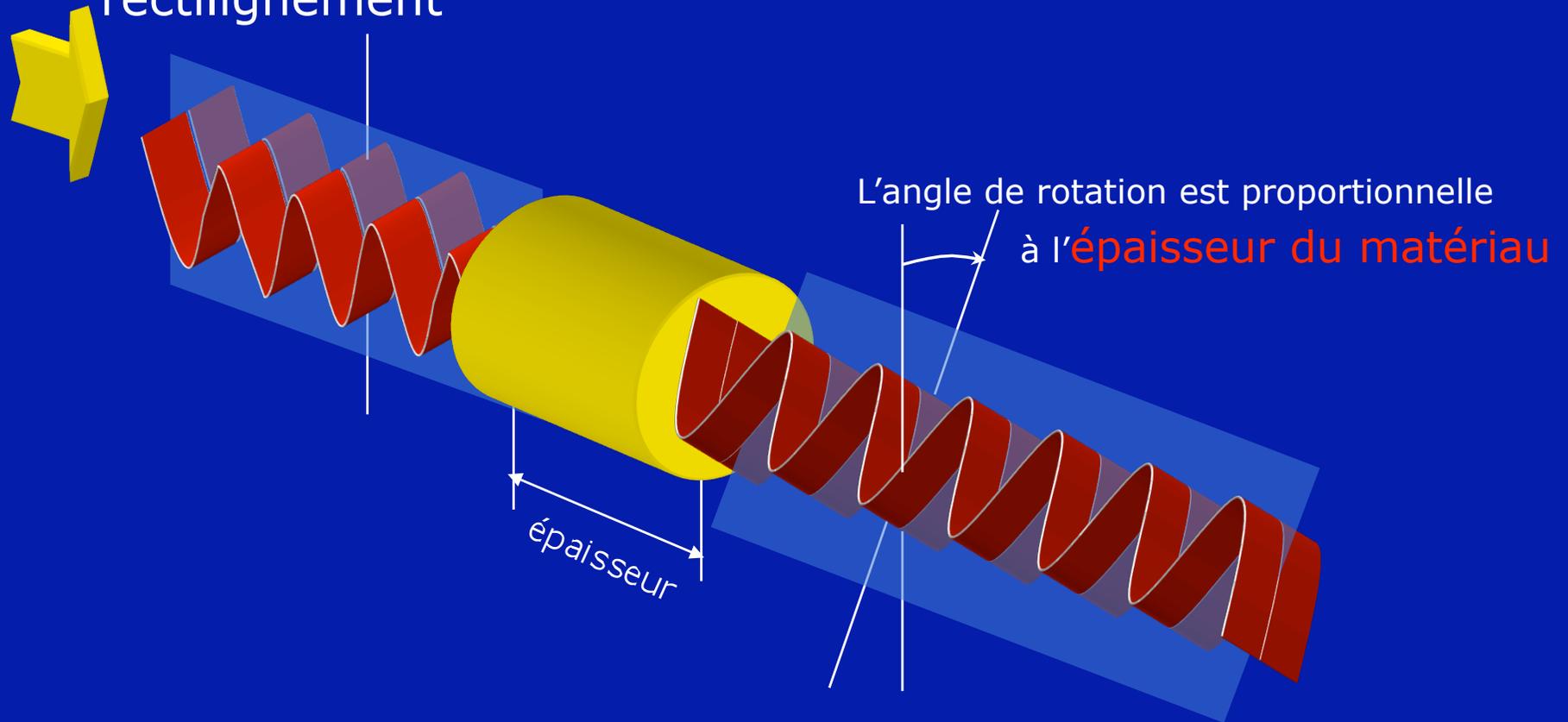
$$\frac{1}{2i\pi} \frac{df}{dx} \xrightarrow{\quad} k F(k)$$

= Dérivée dans
le plan pupille

Multiplication dans le plan focal
(transmission variable)

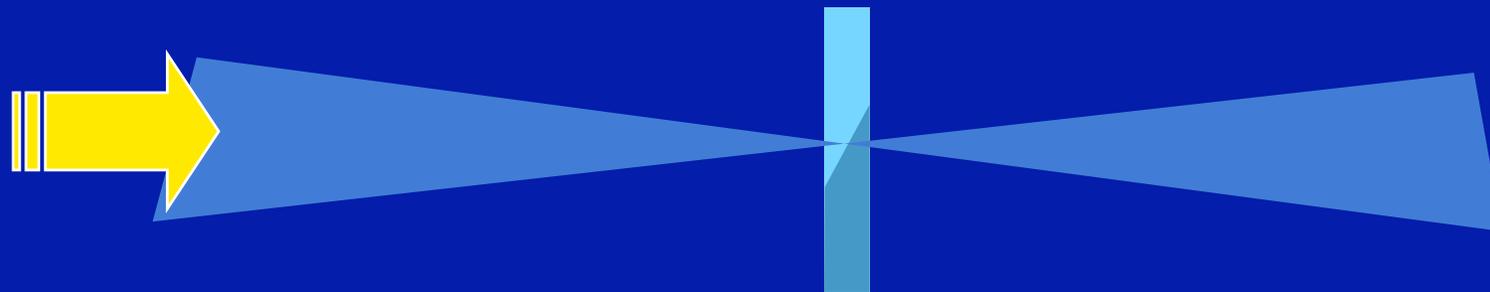
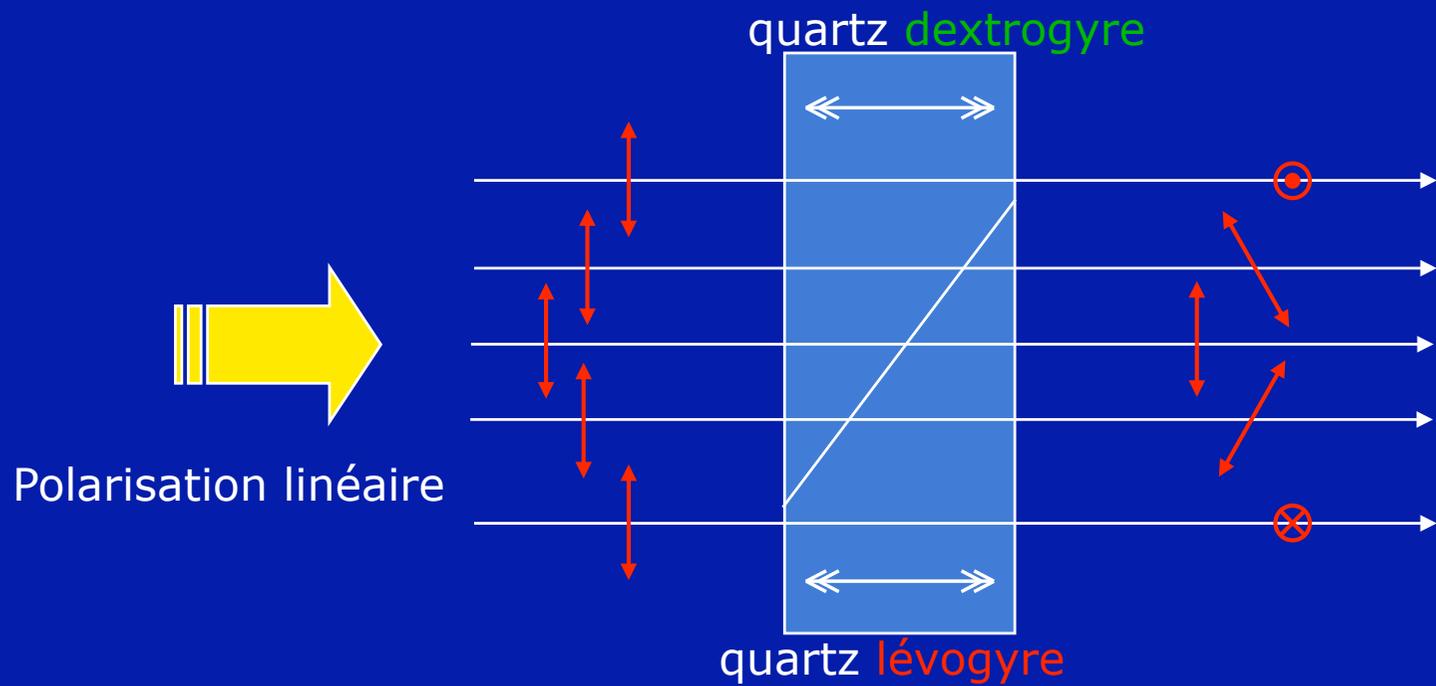
Activité optique

- Propriété de certains matériaux à faire tourner le plan de polarisation d'une onde incidente polarisée rectilignement

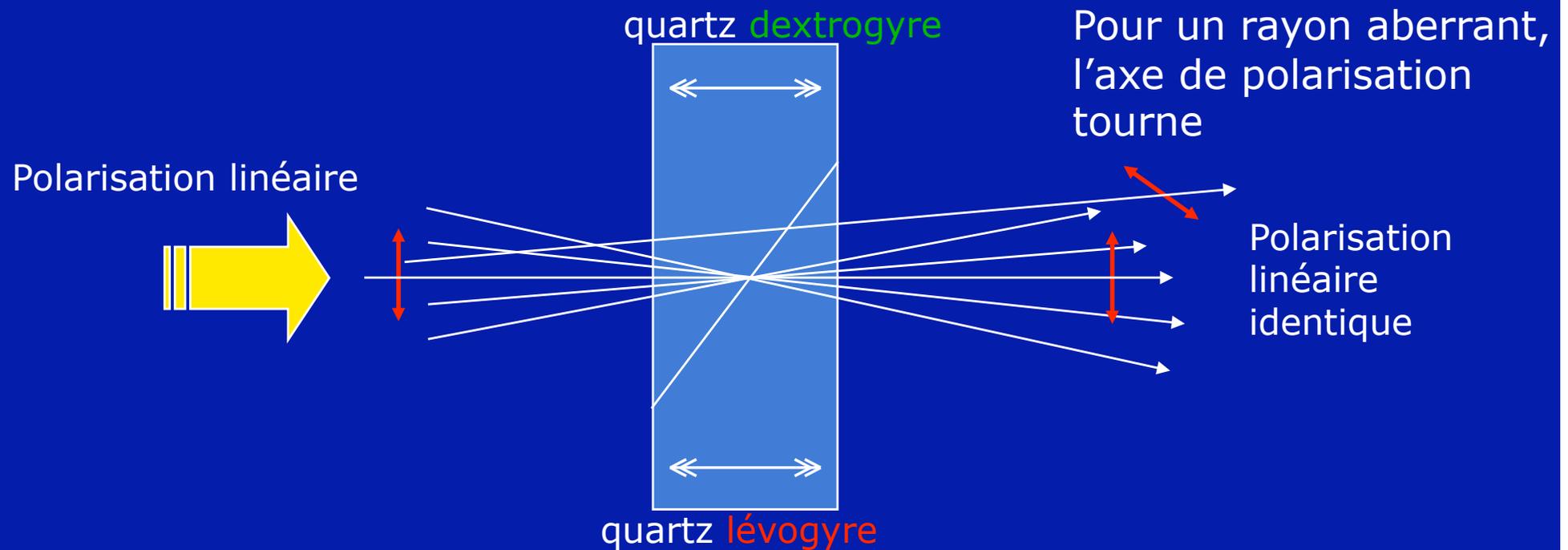


- Apparaît dans certaines solutions (sucre)
- Existe aussi dans certains cristaux (quartz)

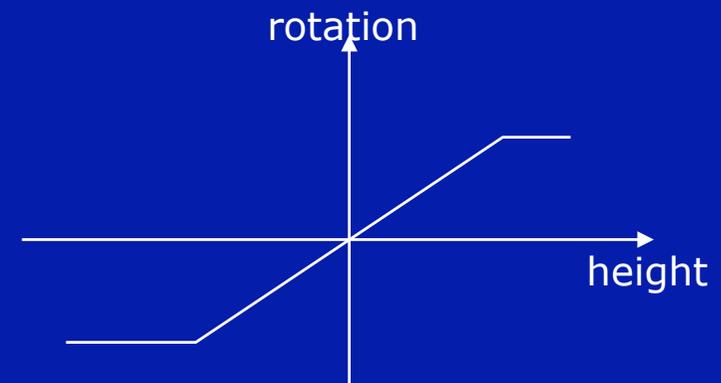
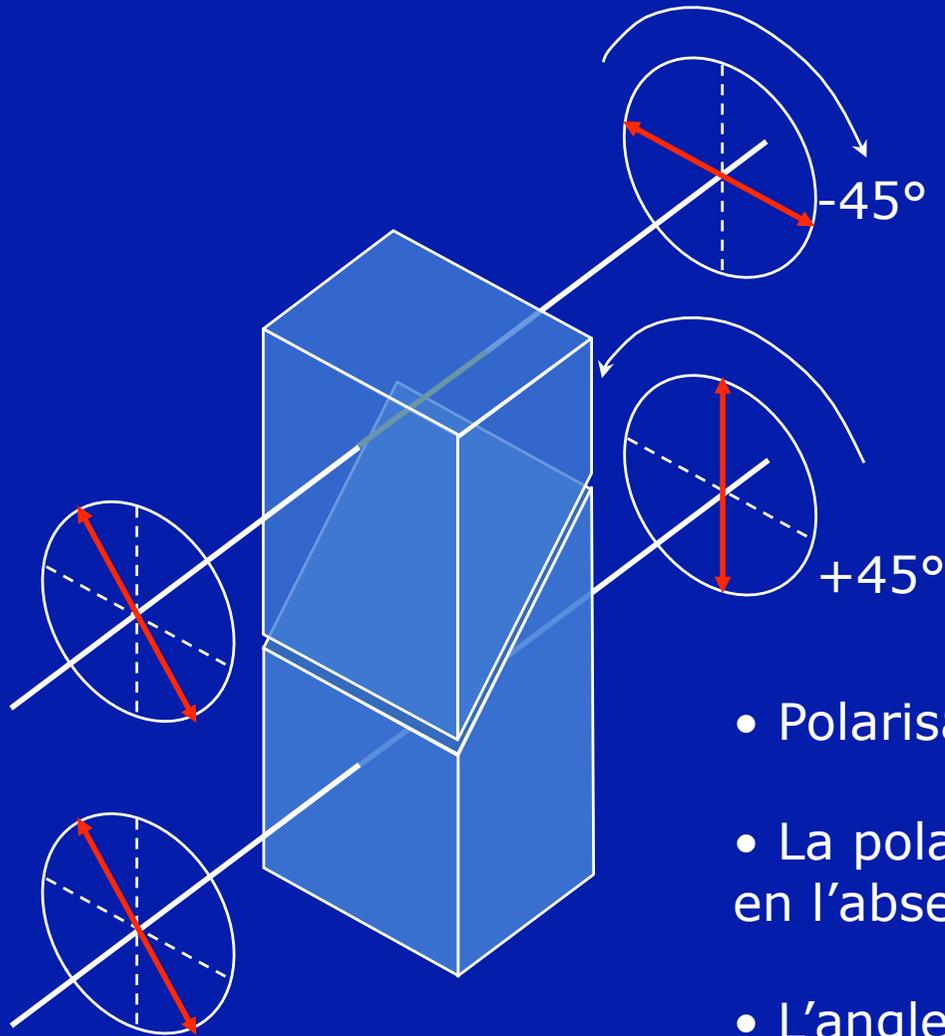
Prismes à activité optique



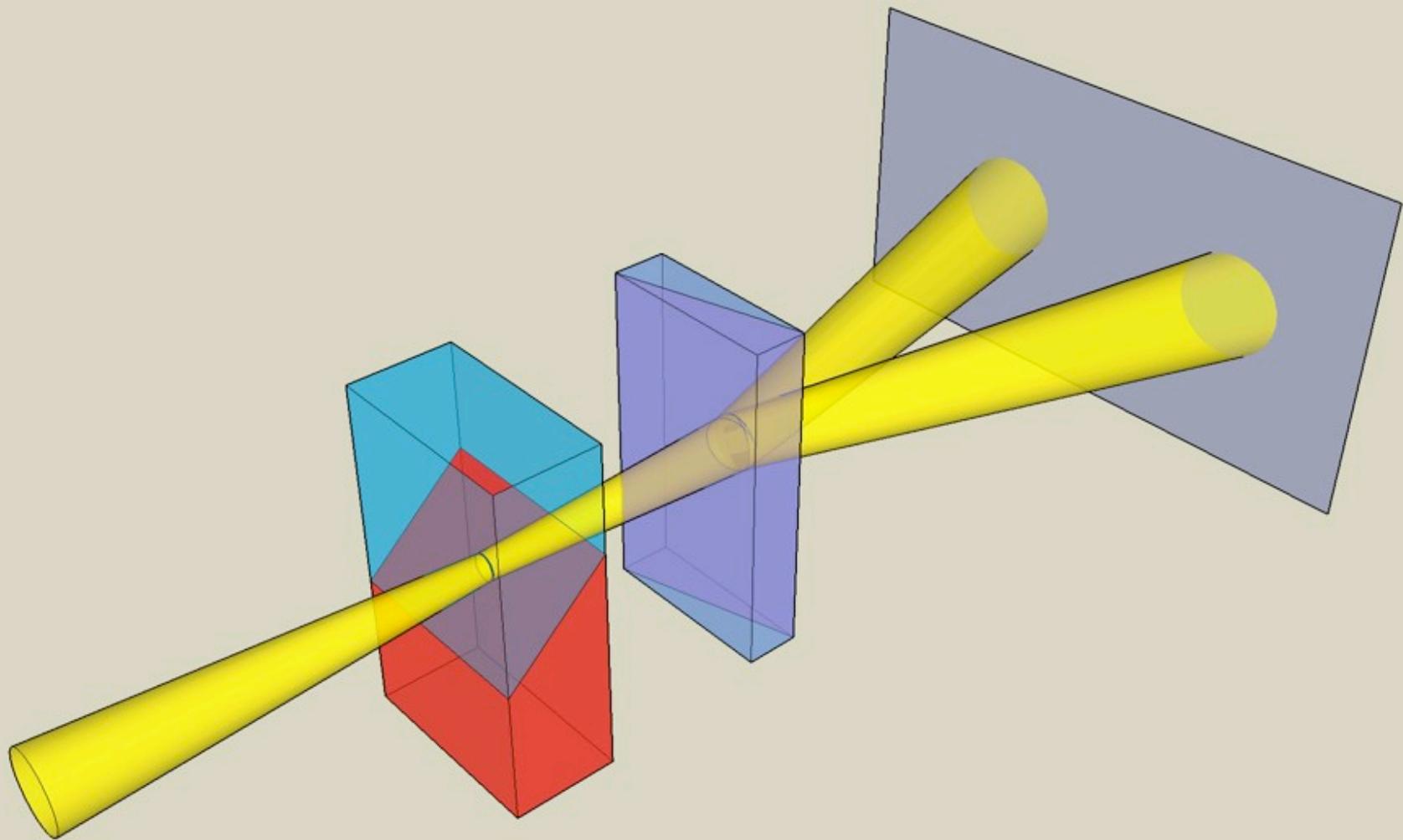
Prismes à activité optique



Prismes à activité optique

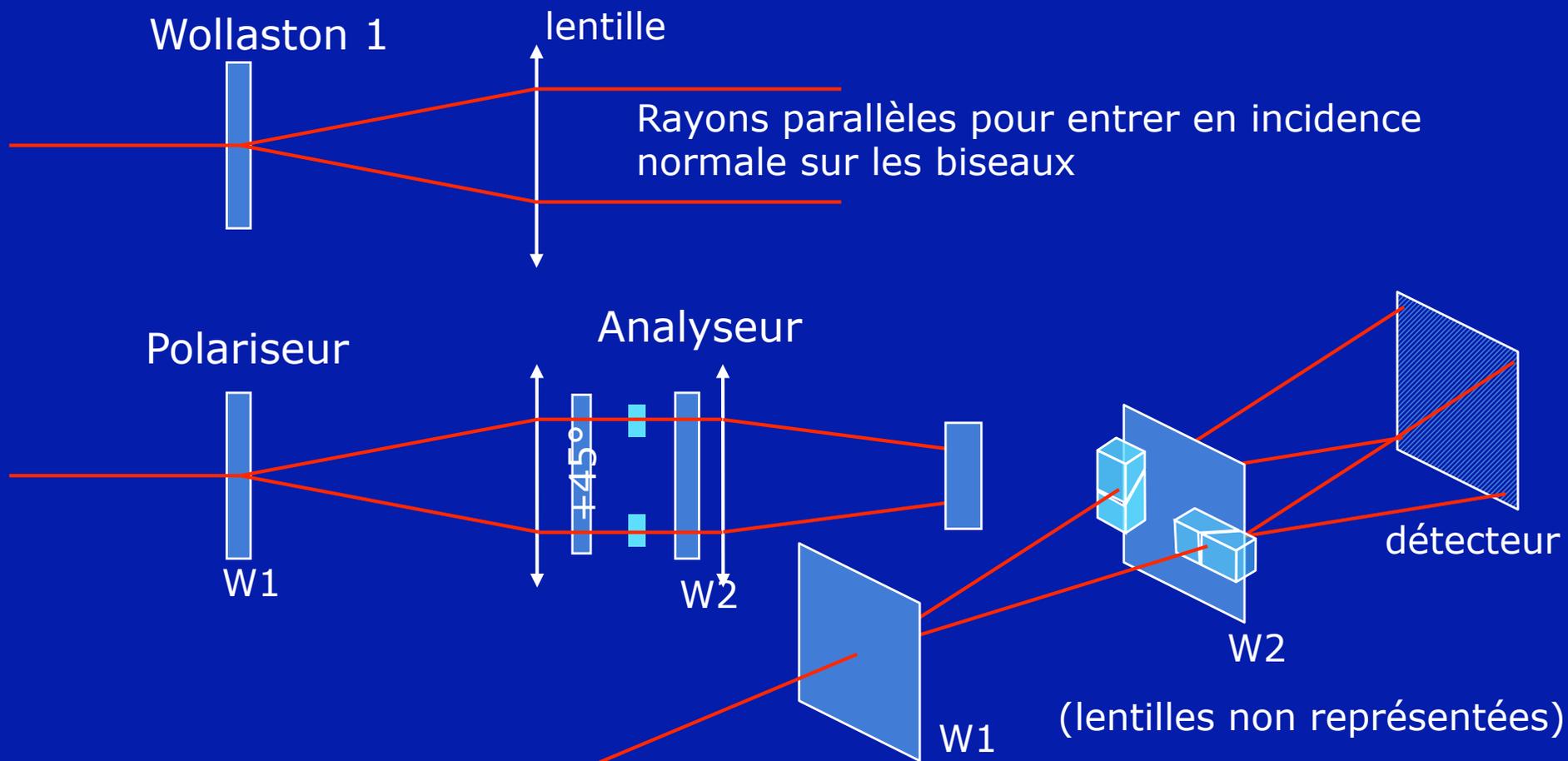


- Polarisation incidente à 45°
- La polarisation de sortie est toujours à 45° en l'absence d'aberrations
- L'angle de rotation de la polarisation est proportionnel à la hauteur d'impact du rayon



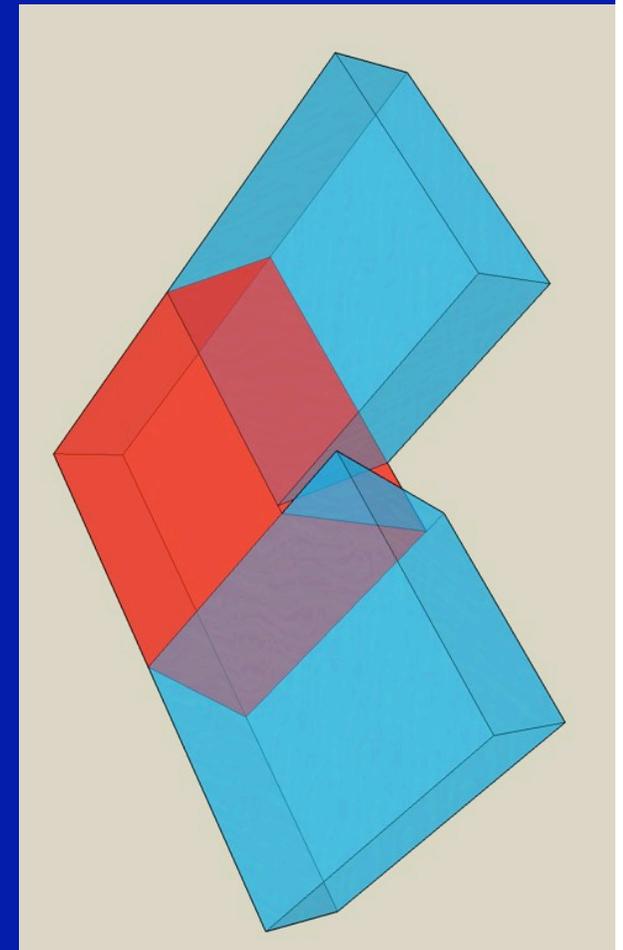
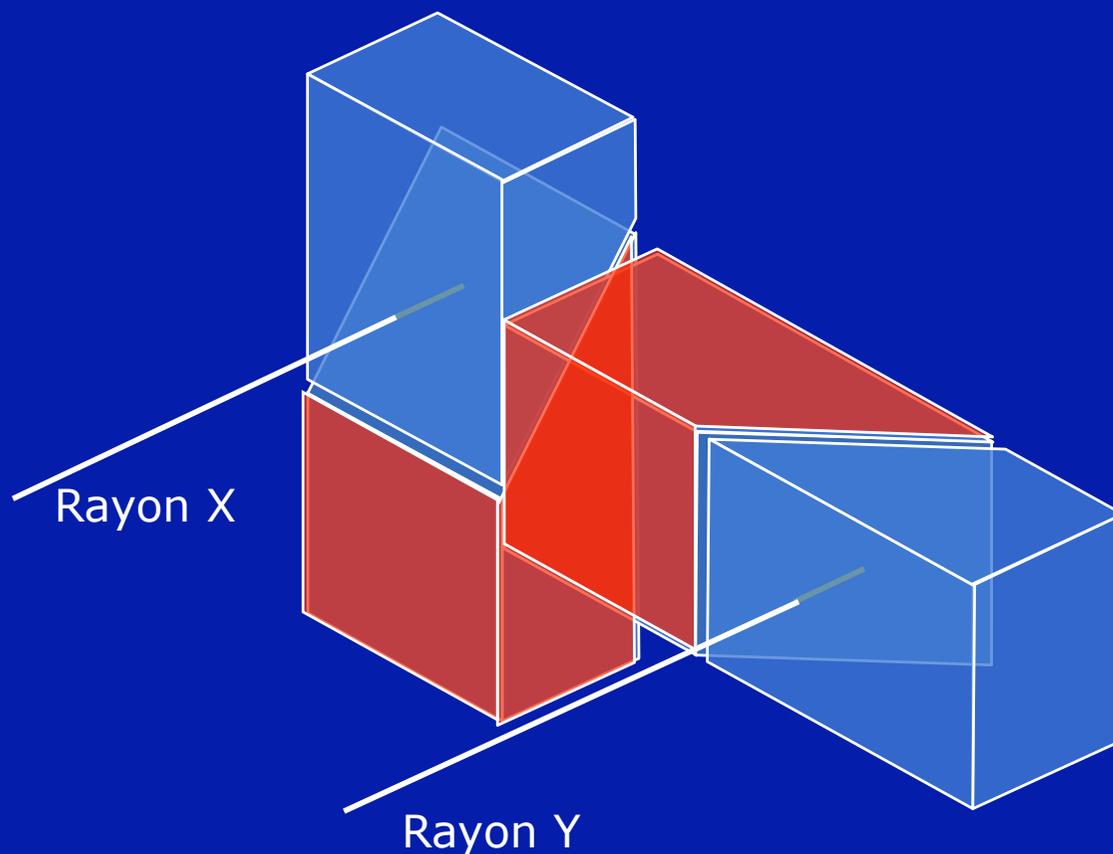
Montage optique

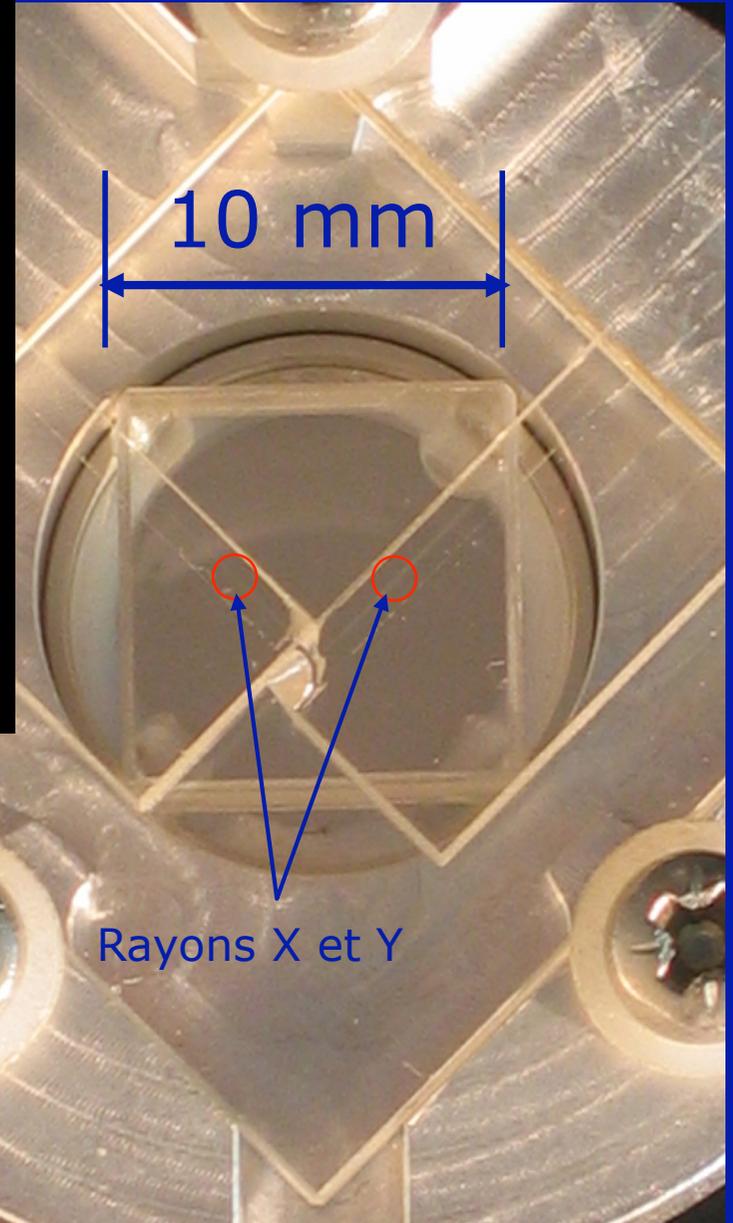
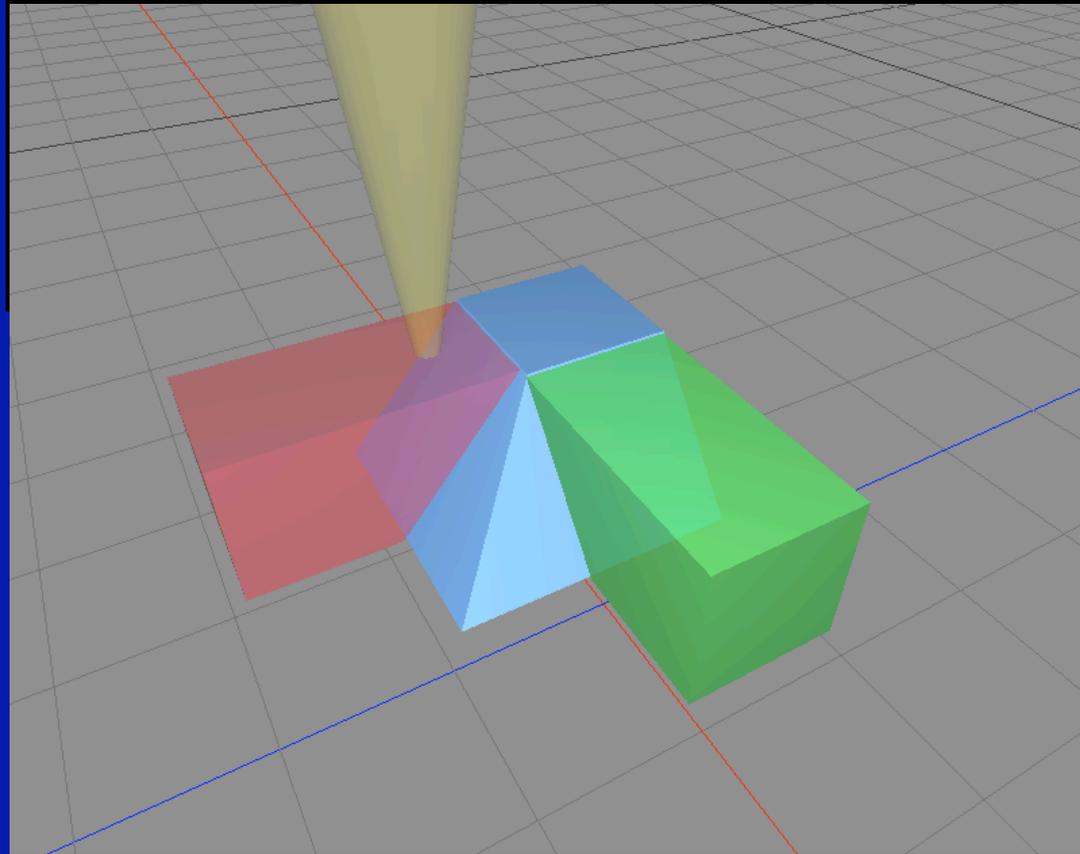
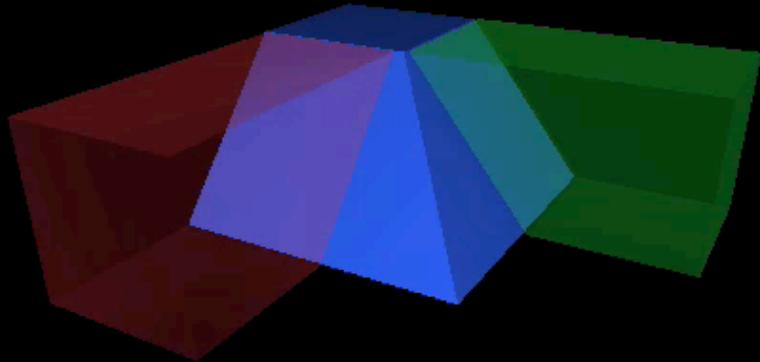
- Le Wollaston 1 sépare et polarise le faisceau en 2
- Le Wollaston 2 analyse les polarisations en sortie
- Les lentilles forment l'image de la pupille sur le détecteur

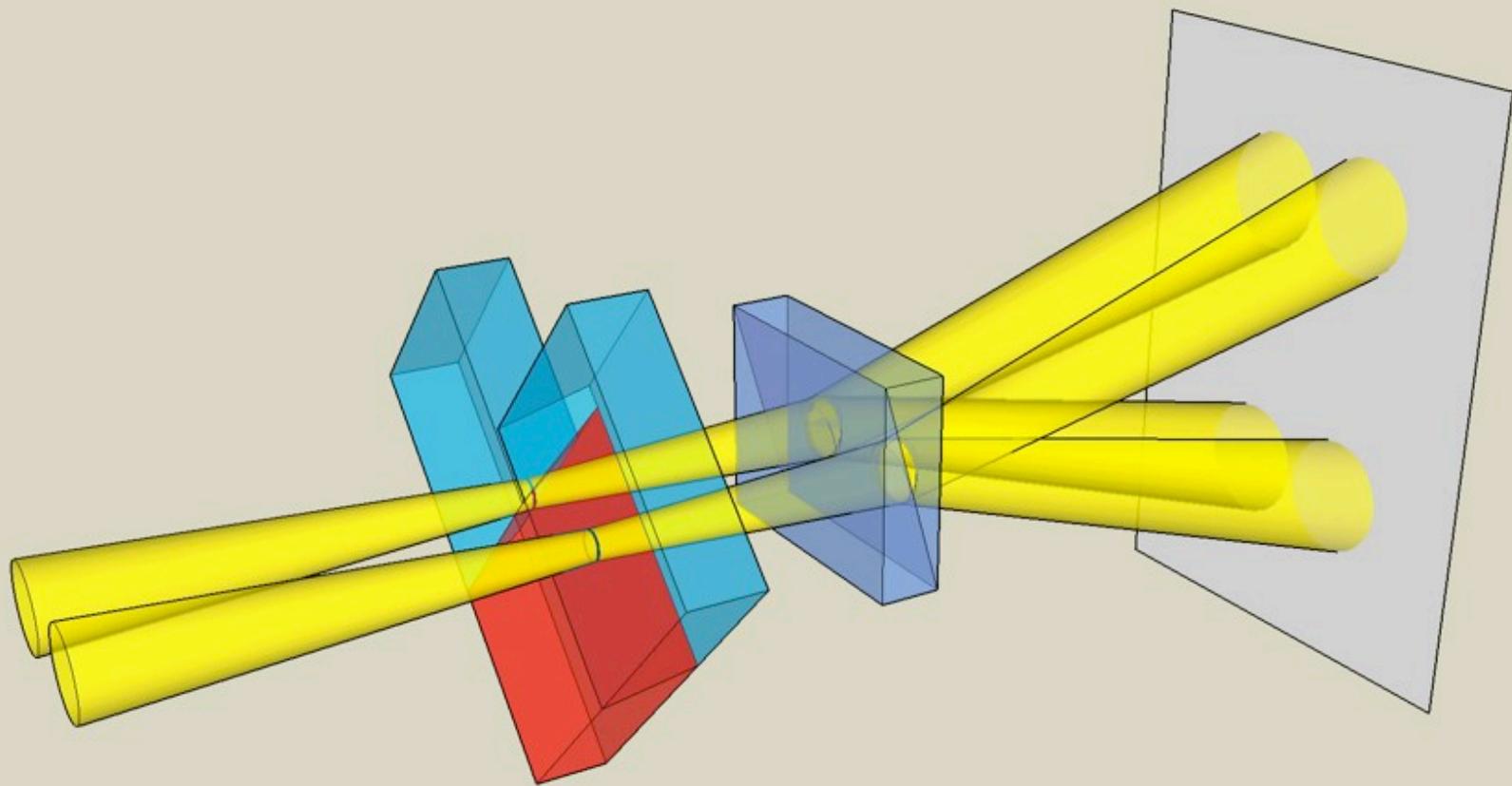


Réalisation technique

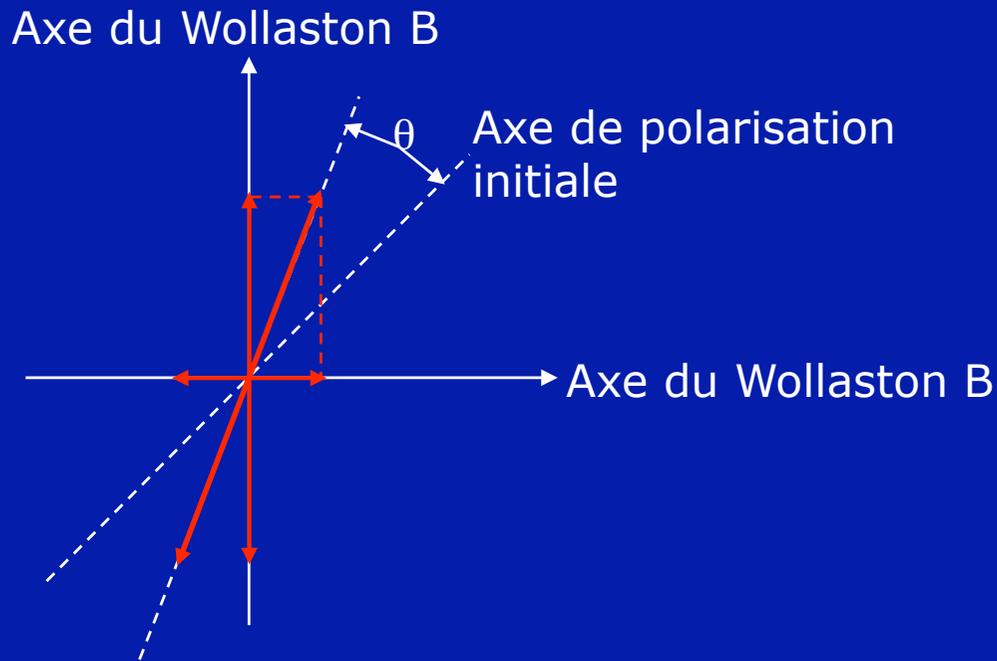
- Les prismes font seulement 2.40 mm d'épaisseur (rotation de 45° dans le quartz)
- La taille du biseau dépend des caractéristiques du télescope et de la dynamique souhaitée







Traitement des données



- Le gradient est obtenu en combinant les images de la pupille

$$\text{rotation} = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{A - B}{A + B}\right) \approx \frac{90^\circ}{\pi} \cdot \left(\frac{A - B}{A + B}\right)$$

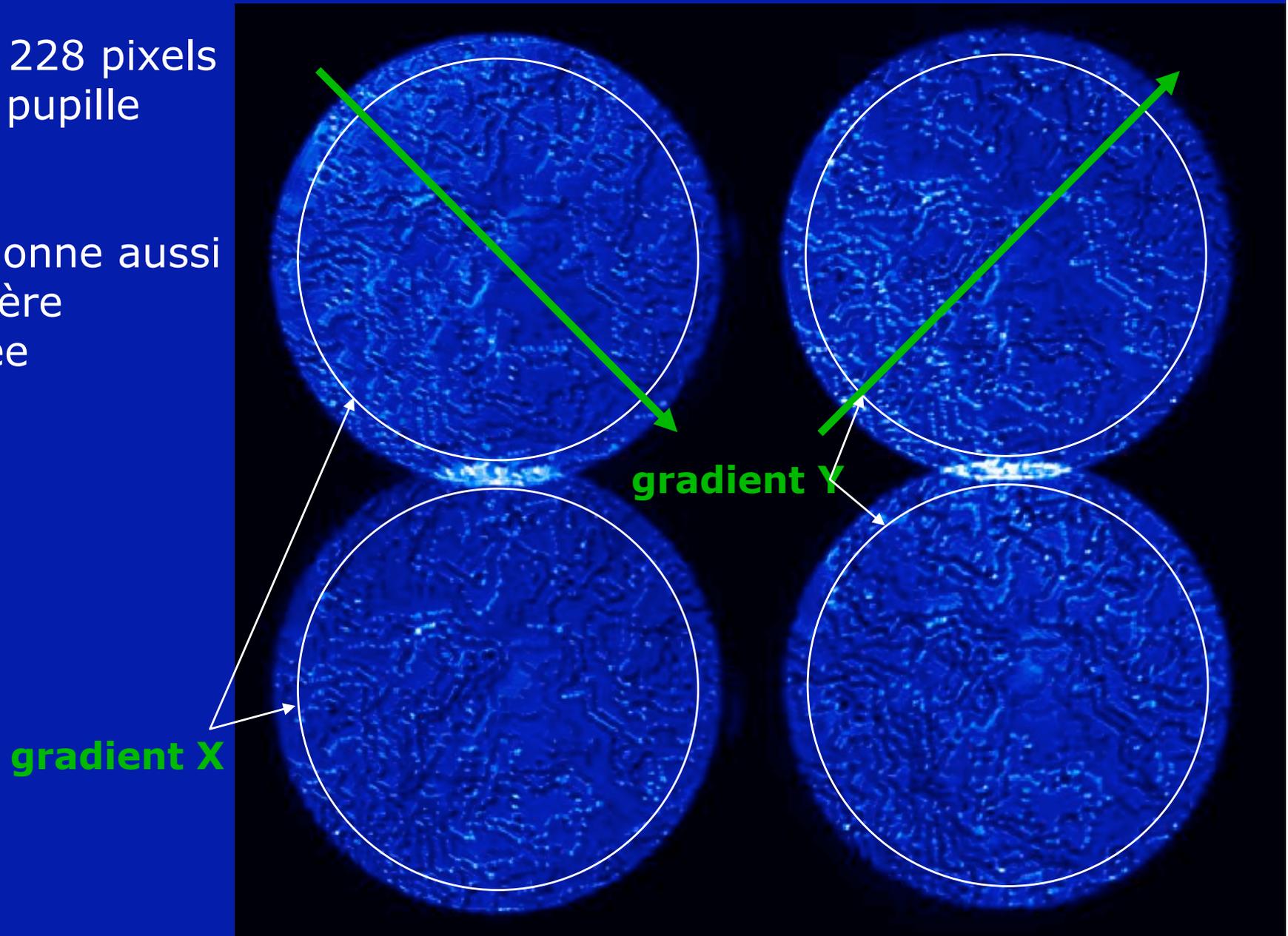
- Indépendant de la taille de la source
- Etalonnage facile

Configuration expérimentale

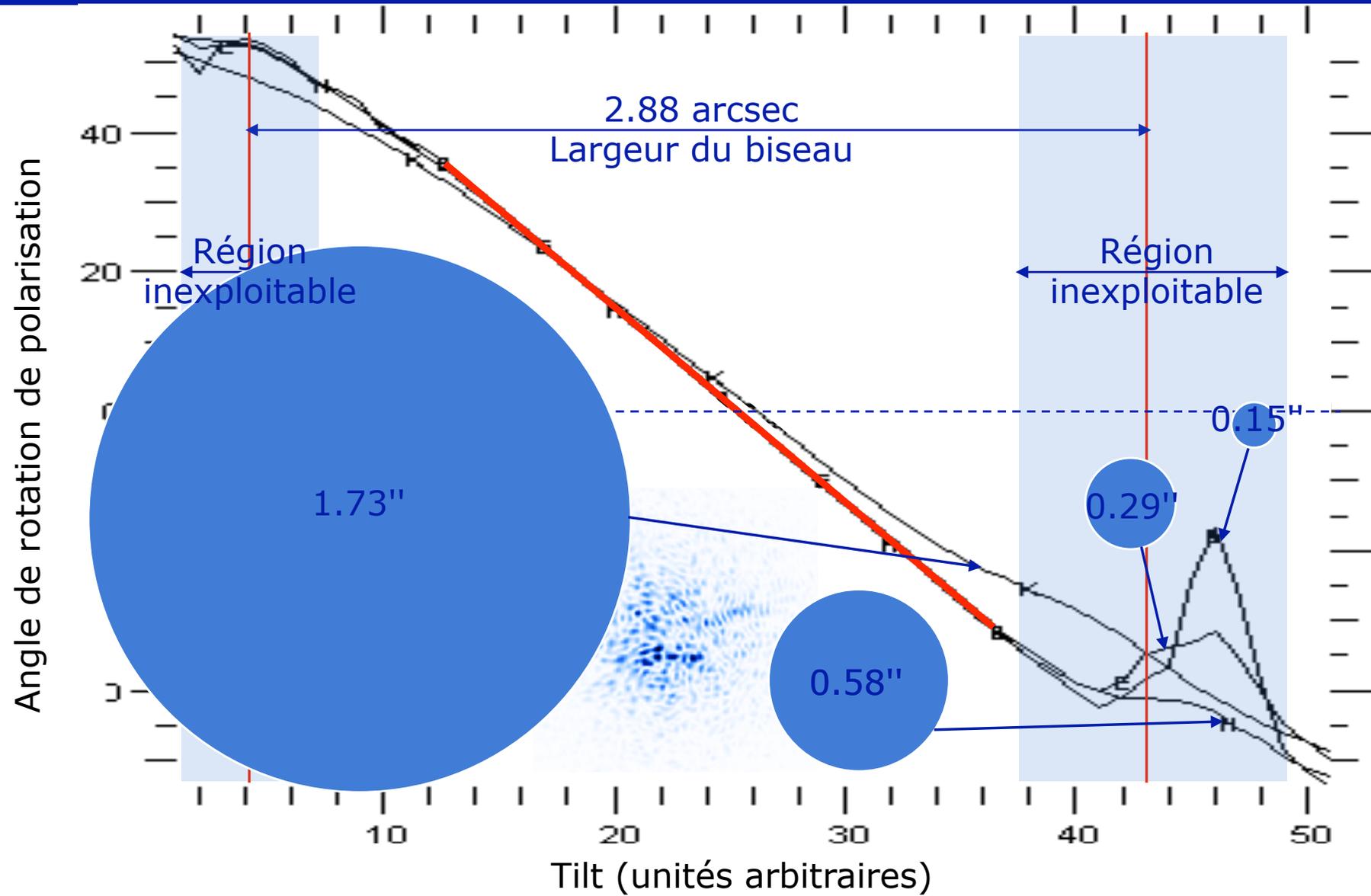
- Caméra
 - SONY HR300, RON = 35 e-/pixel
 - gain = 27e-/ADU
- Biseau
 - Largeur = 1.10 mm
 - f/17
 - $\lambda = 0.620 \mu\text{m}$
- Pupille
 - 228 pixels de diamètre
- Télescope/seeing équivalence
 - 4.20 m
 - 0.5" seeing
 - Le biseau fait 2.88" de large

Premiers résultats

- 228 x 228 pixels dans la pupille
- Fonctionne aussi en lumière polarisée



Linéarité

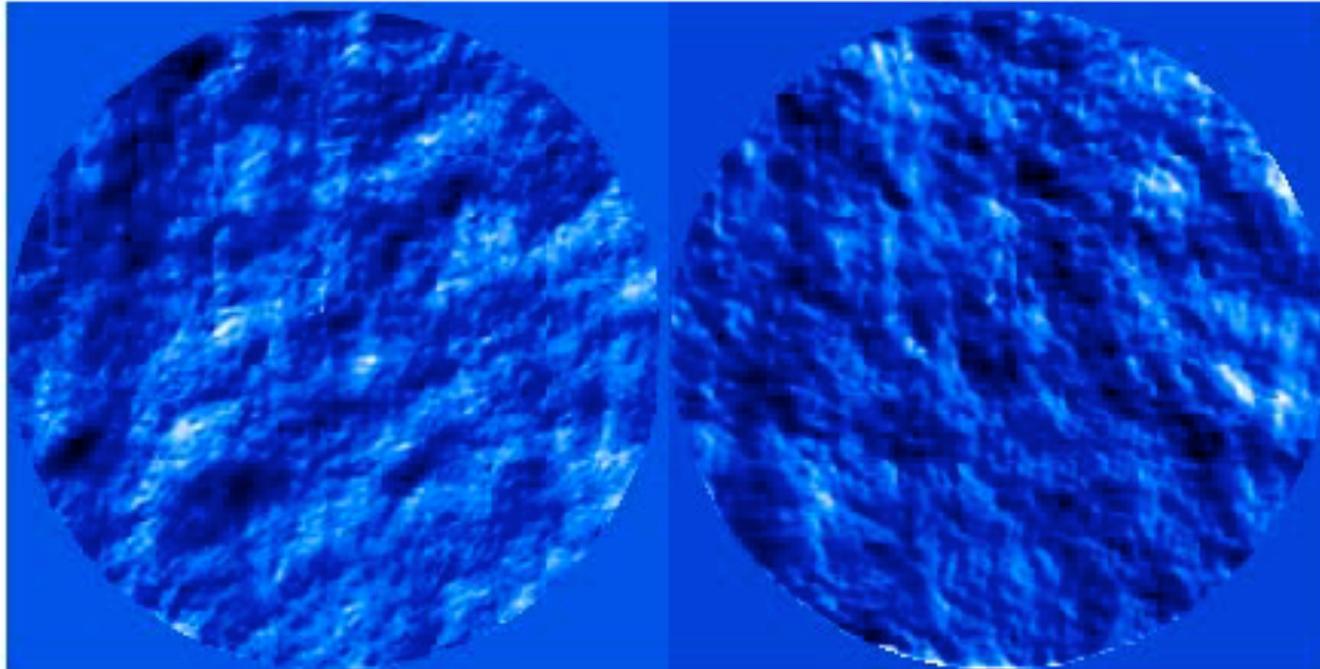


Résultats sur une simulation d'étoile artificielle

- La source est circulaire, de diamètre 0.58"
- Le profil allongé est obtenu en déplaçant la source pendant la durée de l'exposition
- Une défocalisation de 10 mm à f/17
 - 4.20 m télescope, 16km d'épaisseur, à 90 km d'altitude
 - 5.20 m télescope, 10km d'épaisseur, à 90 km d'altitude
 - 8 m télescope, 4.5km d'épaisseur, à 90 km d'altitude

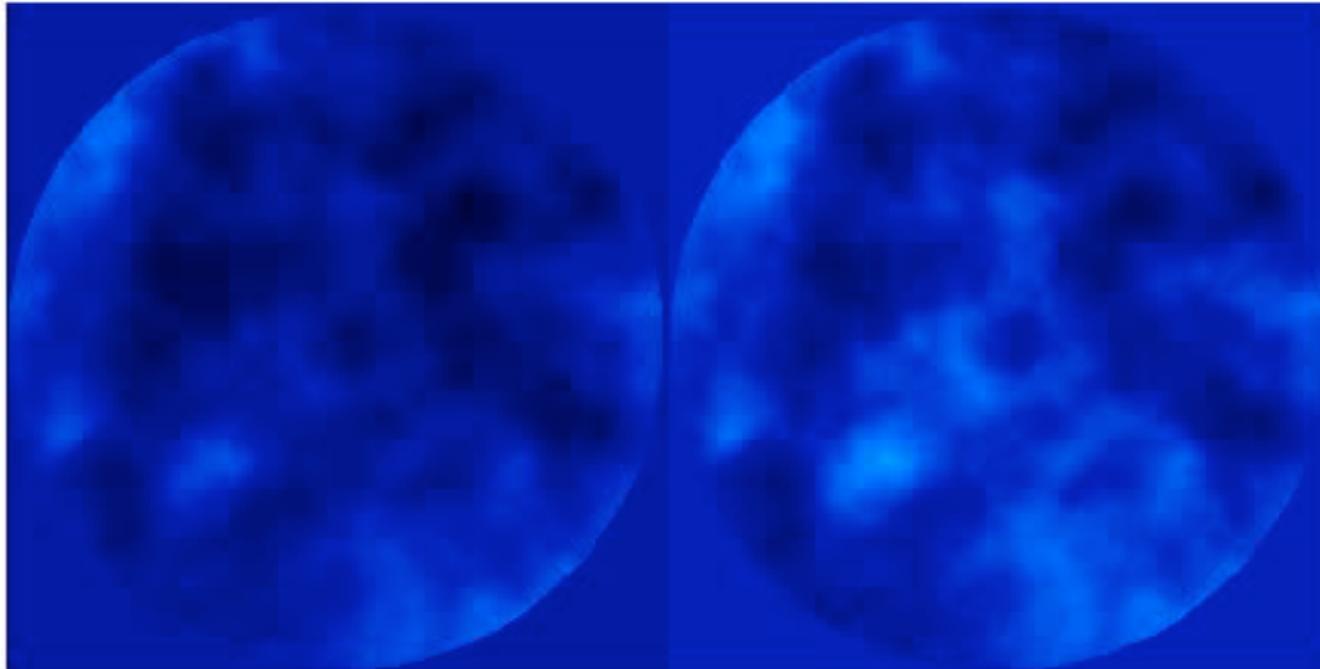
Résultats sur la simulation d'étoile artificielle

- Gradients mesurés lors de la défocalisation de la source :



Résultats sur la simulation d'étoile artificielle

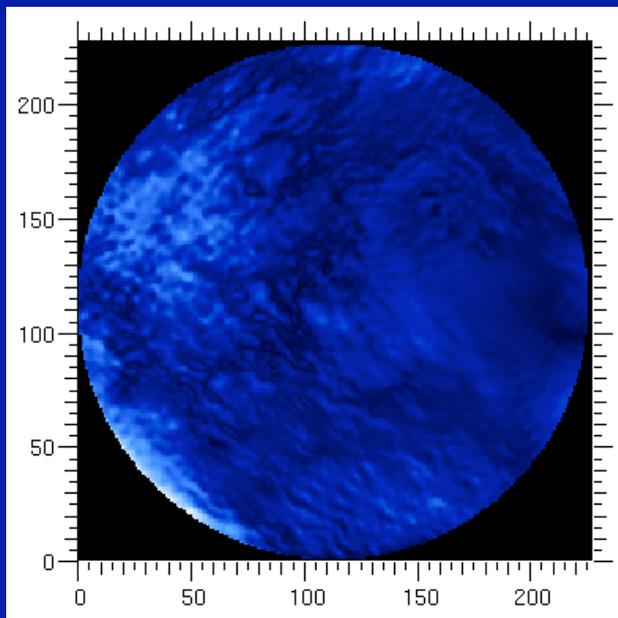
- Phase mesurée lors de la défocalisation de la source :



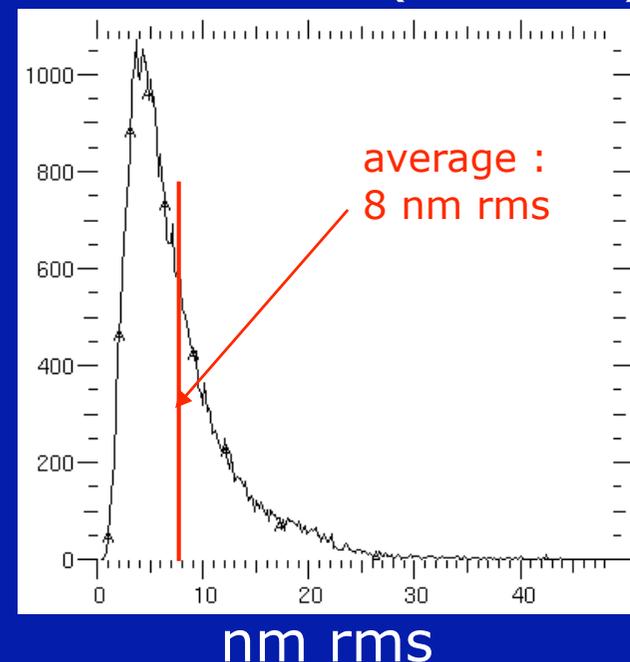
Résultats sur la simulation d'étoile artificielle

- Erreur sur le front d'onde mesuré : 8nm rms.
- La plus grande partie des variations provient des aberrations pupillaire

Erreur rms du front d'onde mesuré

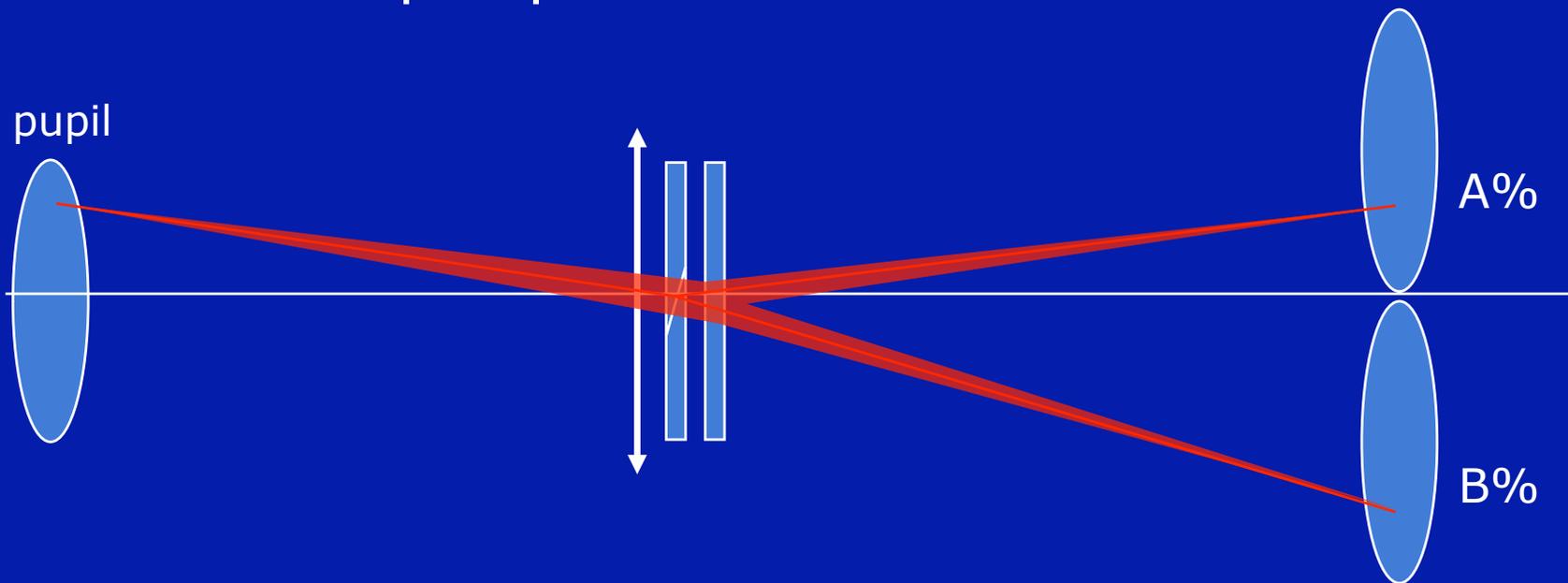


Histogramme de l'erreur rms (nm rms)



Bruit

- L'**extension spatiale** de la source influe sur la **variance du bruit** de (presque) tous les ASO ...
- ... mais pas pour ADONF



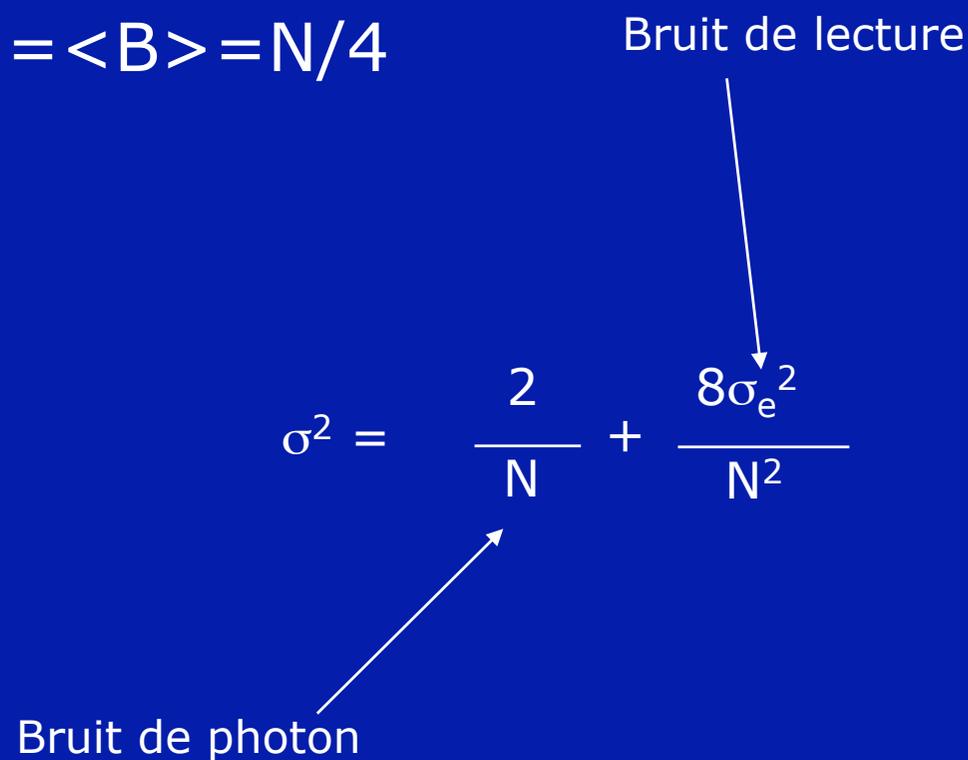
Mesure du bruit

- N photoélectrons/sous-pupille
- N/2 photoélectrons par gradients
- $(A-B)/(A+B)$ $\langle A \rangle = \langle B \rangle = N/4$

- Variance de : $\left[\frac{A-B}{A+B} \right]$

$$\sigma^2 = \frac{2}{N} + \frac{8\sigma_e^2}{N^2}$$

Bruit de photon



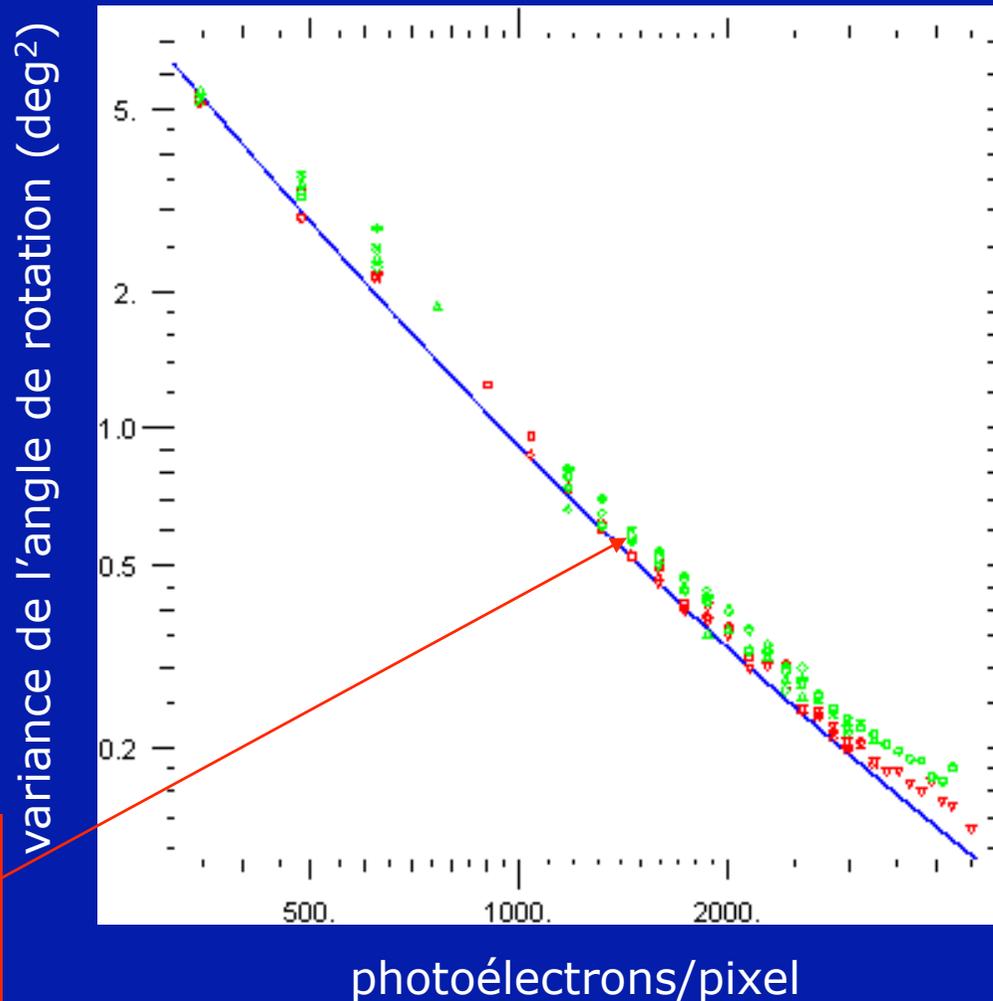
Bruit de lecture

Mesure du bruit

- Très bonne corrélation avec les prévisions théoriques

Camera :
SONY HR300
RON = 35e-/pix

Objets étendus et
ponctuels :
0.15", 0.3", 0.6 and 1.7"



Mesure du bruit

- N photoélectrons/sous-pupille
- N/2 photoélectrons par gradients
- $(A-B)/(A+B)$ $\langle A \rangle = \langle B \rangle = N/4$

- Variance de : $\left(\frac{A-B}{A+B} \right)$ $\sigma^2 = \frac{2}{N} + \frac{8\sigma_e^2}{N^2}$

- Variance du bruit sur les gradients :

$$\sigma_\phi^2 = 4 \left(\frac{w}{\lambda/d_{\text{sub}}} \right)^2 \left(\frac{2}{N} + \frac{8\sigma_e^2}{N^2} \right)$$

Largeur du biseau

Mesure du bruit

- Variance du bruit sur les gradients

$$\sigma_{\phi}^2 = 4 \left(\frac{w}{\lambda/d_{\text{sub}}} \right)^2 \left(\frac{2}{N} + \frac{8\sigma_e^2}{N^2} \right)$$

photoe-/souspup/image

- Régime de bruit de photon

ELT
w = 6"
λ = 589 nm

$$\sigma_{\phi}^2 = 8 \frac{w^2}{\lambda^2 N_0} = 2 \cdot 10^4 / N_0 \text{ (rd}^2 \text{ at } \lambda_{\text{Na}})$$

$$= 2500 / N_0 \text{ (rd}^2 \text{ at H)}$$

photoe-/m²/image

ELT
w = 6"
λ = H band

Inconvénients

- Chromatique
- Poussières dans le plan focal
- Peut-être moins sensible qu'un Hartmann avec filtrage adapté optimisé
- Divise l'intensité lumineuse en 2 faisceaux

Avantages

- Il fonctionne comme prévu
- Linéaire, avec une grande dynamique
- La réponse ne dépend pas de la taille/forme de la source
- Seulement 2x2 pixels par point de mesure
 - Ne demande aucun développement de CCD
 - Lecture plus lente du CCD : moins de bruit de lecture
- Facile à construire
- Design simple, aucune modulation nécessaire
- Pas de problèmes d'aberrations statiques (contr. aux 4-cell SH)
- Pas de spot à échantillonner, la taille des pixels n'a pas à être ajustée

Simulation pour un ELT sur le banc SESAME

Objectifs :

- Valider le concept pour un ELT avec une simulation d'étoile artificielle plus réaliste
- Comparer sur des simulations identiques les performances d'ADONF et du SH

