

L'ÉTOILE LASER : UNE RÉFÉRENCE DE PHASE POUR L'OPTIQUE ADAPTATIVE

Renaud Foy^{1,2}

¹*CRAL - Observatoire de Lyon, France*

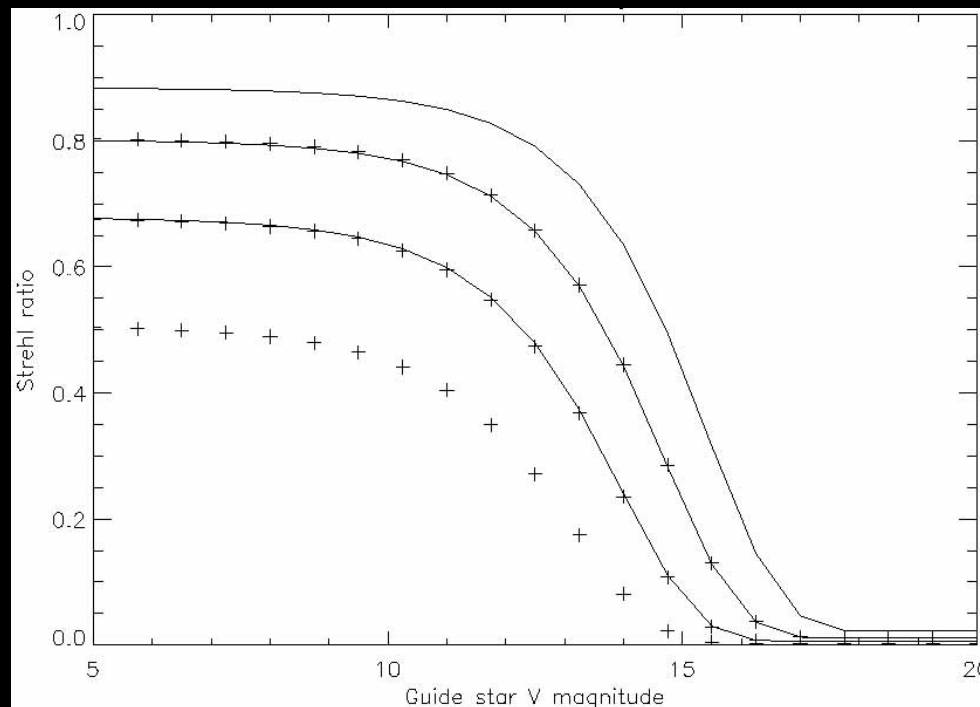
Université de Lyon, F-69000 Lyon, France; Université de Lyon 1, F-69622 Villeurbanne, France; Centre de Recherche Astrophysique de Lyon, Observatoire de Lyon, 9 avenue Charles André, F-69561 Saint-Genis Laval cedex, France; CNRS, UMR 5574; Ecole Normale Supérieure de Lyon, F-69007 Lyon, France

²*Observatoire de Haute-Provence F-04870 Saint-Michel l'Observatoire, France ; CNRS, USR 2207*

JRIAO - Arcachon

21-22/11/2007

L'optique adaptative requiert une *référence de phase*.



Isoplanétisme : $\theta \approx r_0/D \approx 30''$ @ $2.2\mu\text{m}$,
 $5''$ @ $0.55\mu\text{m} \approx 24\mu\text{radian}$

Si \nexists NGS $\ni \theta$

Étoile laser \implies **LGS** (Foy & Labeyrie, 1985)

$$m = -2.5 \log(\text{flux}) + \text{constante}$$

$$m_V = 0 \iff 3.6 \cdot 10^{-11} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$$

$$m_V = 10 \iff 3.6 \cdot 10^{-15} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$$

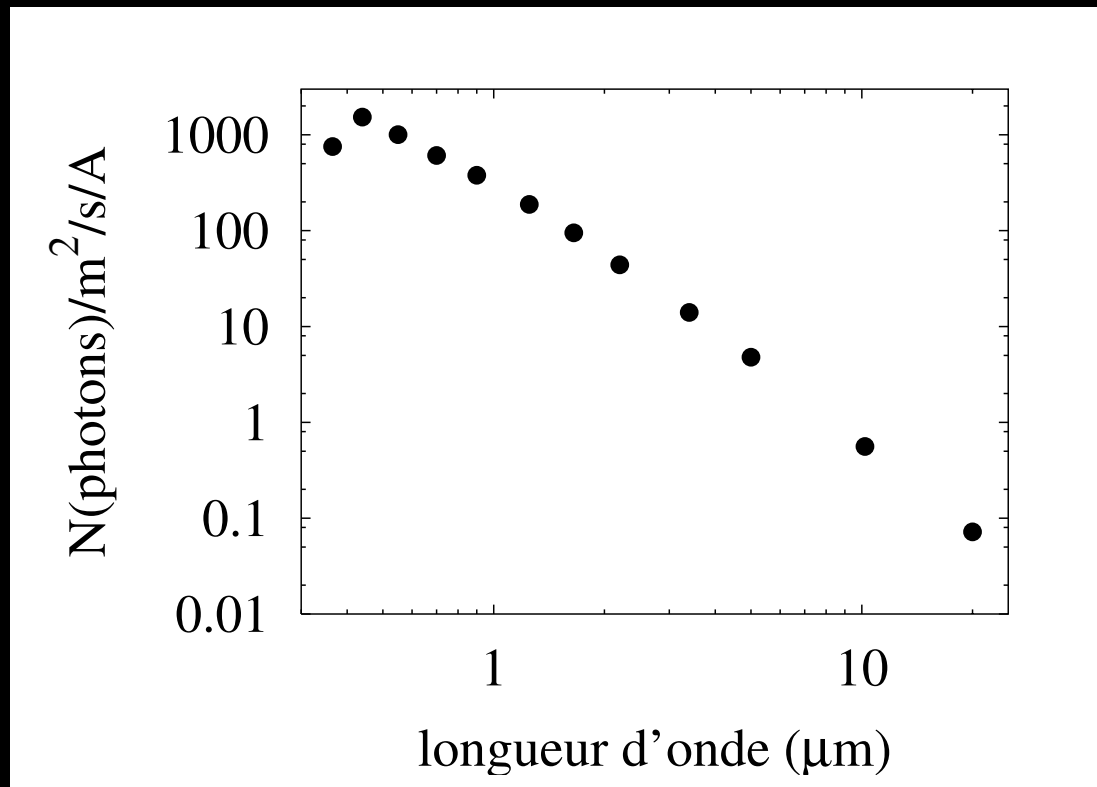
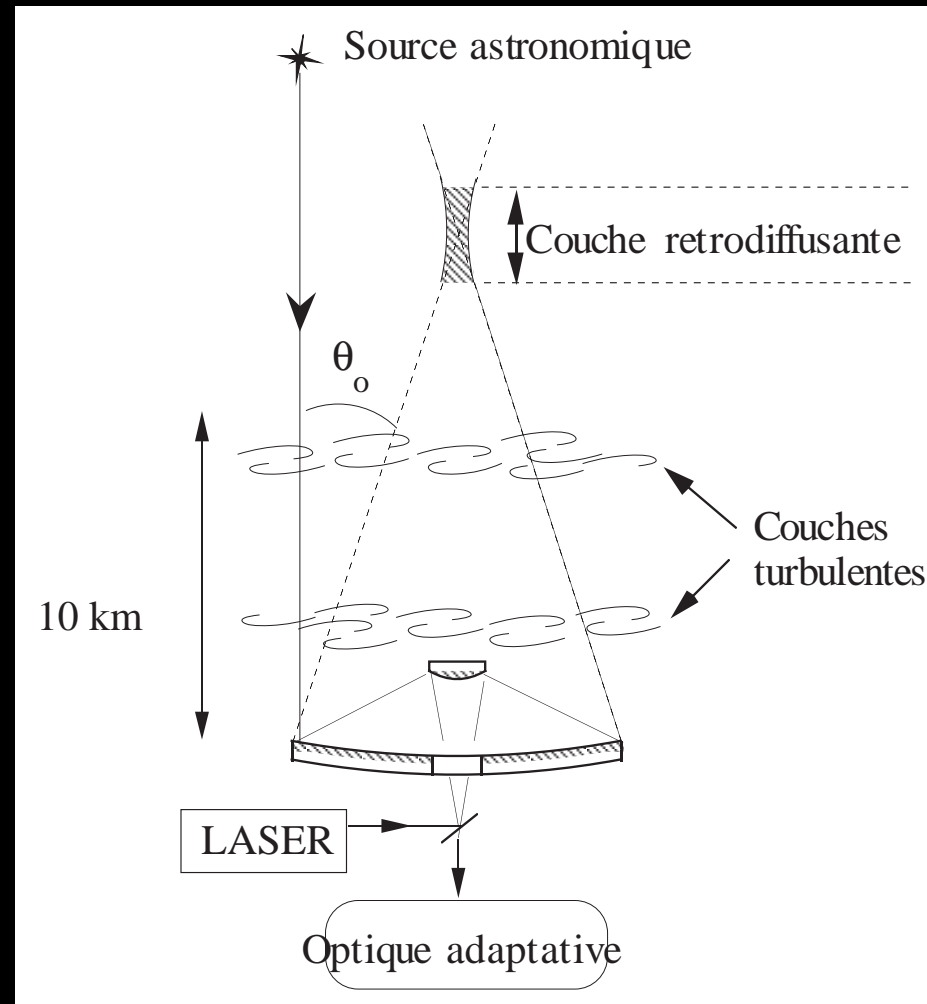


FIG.: Nombre de photons /m², /s et /Å pour une étoile de magnitude 0 et de température ≈10 000 K

Effet de cône

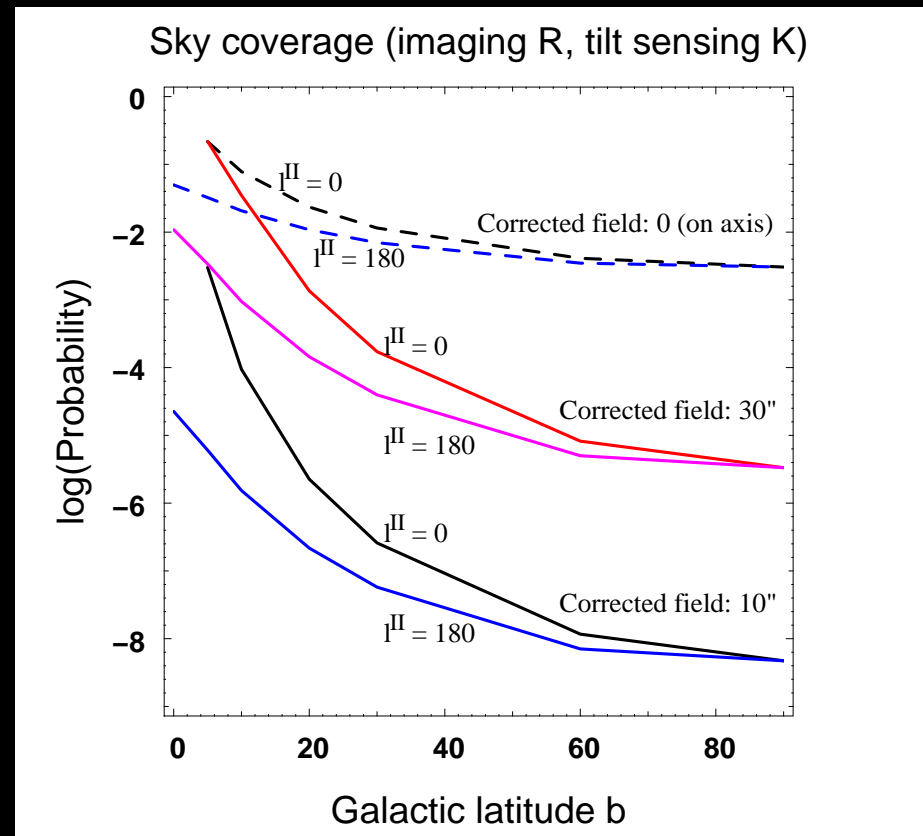


⇒ optique adaptative à ≥ 2 miroirs déformables
 = "MCAO" (Foy et al., 1987 ; Tallon et Foy, 1990 ; Le Louarn et Tallon, 2002)

Mais : Indétermination de la pente

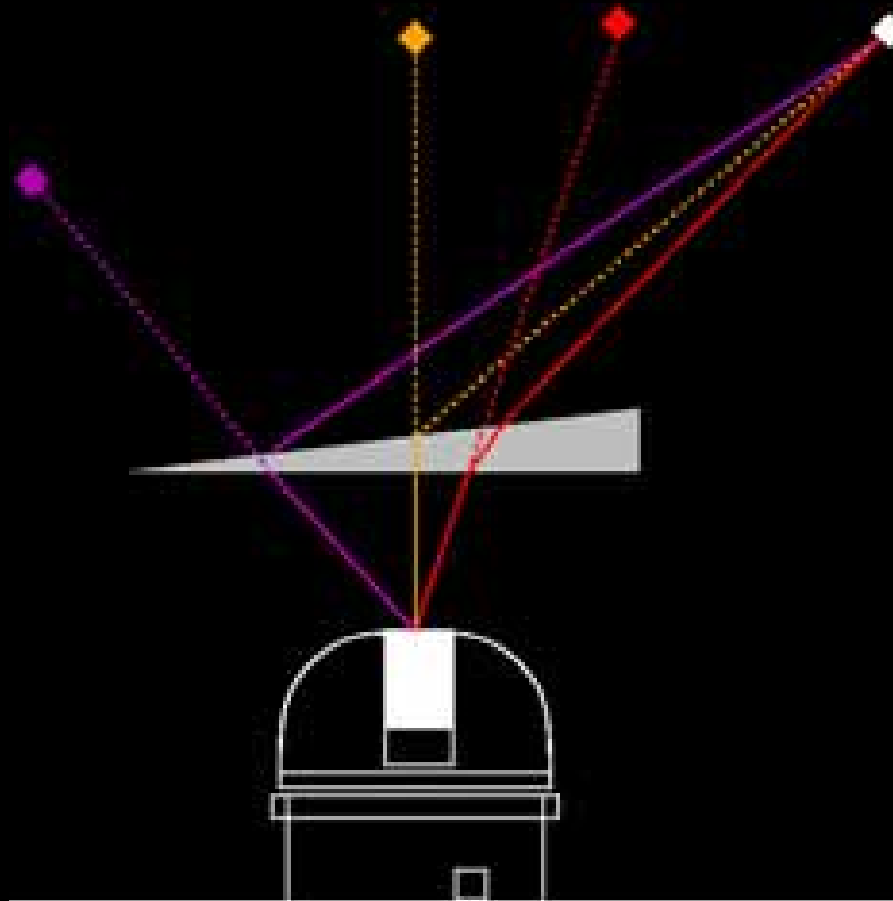
(Pilkington, 1987)

⇒ **NGS encore** mais limitation en *couverture du ciel*



Étoile laser polychromatique : Principe

$$\frac{\partial n}{\partial \lambda} = f(\lambda)$$



Propriété de séparabilité de λ et des paramètres atmosphériques s'applique à n :

$$n(\lambda, P, T) - 1 = f(\lambda) \times g(P, T) \quad (1)$$

Par différenciation :

$$\Delta n / (n - 1) = \Delta f(\lambda) / \lambda_i \quad (2)$$

Pour la *pente* θ_{λ_i} à la longueur d'onde λ_i :

$$\theta_{\lambda_3} = \Delta \theta_{\lambda_1, \lambda_2} (n_{\lambda_3} - 1) / \Delta n_{\lambda_1, \lambda_2} \quad (3)$$

La pente à λ_i s'exprime en fonction de la différence de pente entre 2 longueurs d'onde.

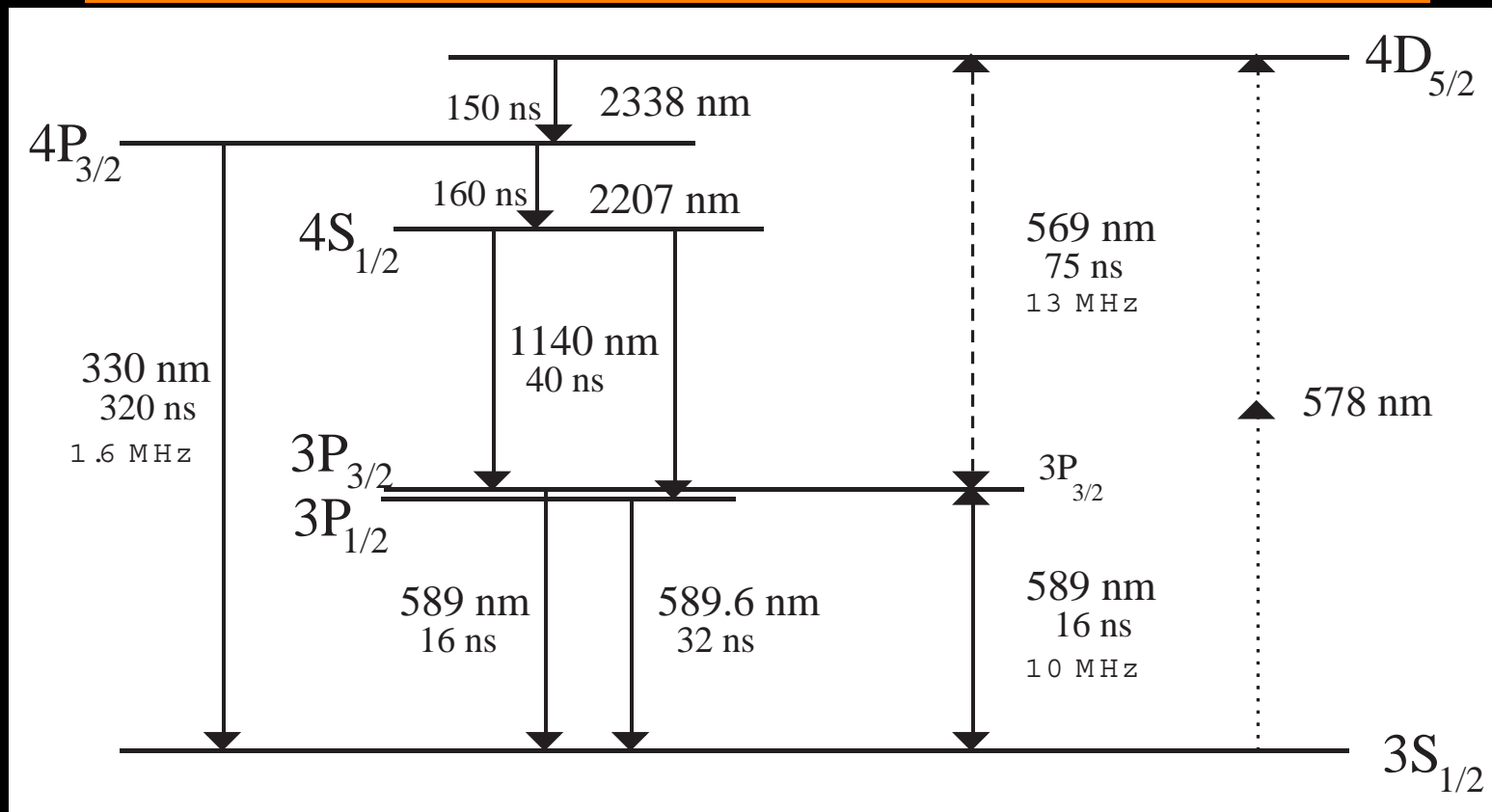
Quel processus d'excitation ?

large intervalle en λ , incluant l'UV lointain

Quel processus d'excitation ?

large intervalle en λ , incluant l'UV lointain

À nouveau : le sodium mésosphérique !



Niveaux d'énergie de l'atome de sodium.

ÉTUDE de FAISABILITÉ

achevée :

- FLUX RETOURNÉ @ 330NM
- PRÉCISION DES MESURES DE LA PENTE
- BILAN DE LIAISON
- MODÈLES DE PHYSIQUE ATOMIQUE
- VIBRATIONS DU TELESCOPE

+

- ANALYSE FONCTIONNELLE
- AVANT PROJET SOMMAIRE
- PHASE B

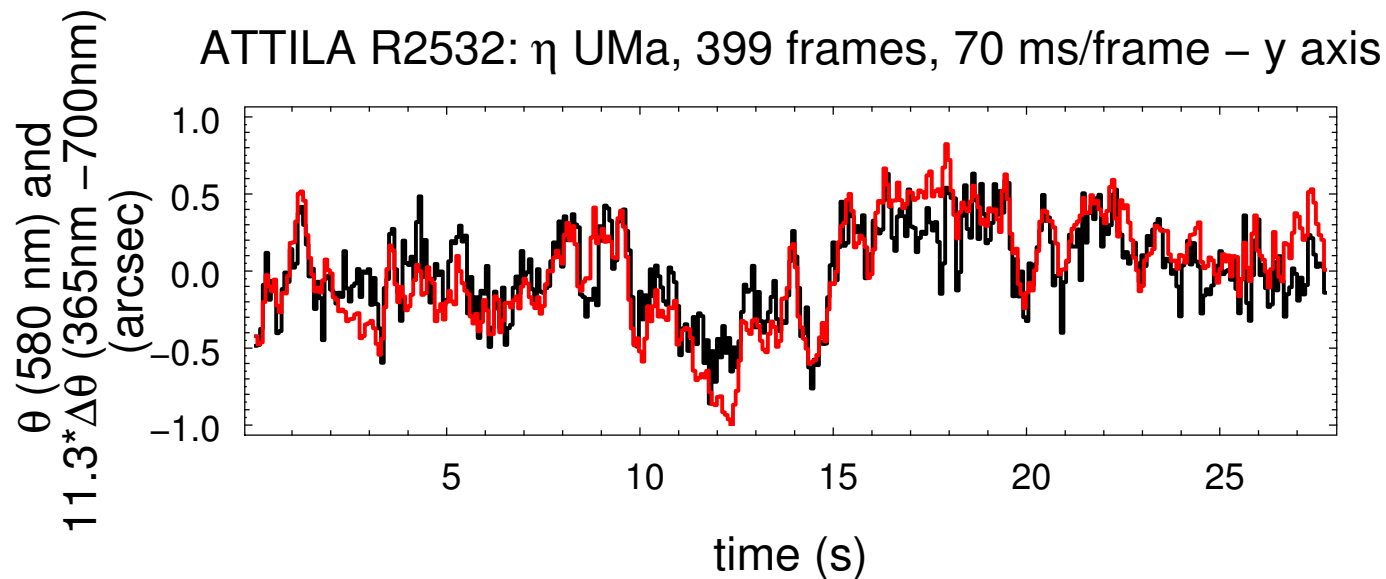
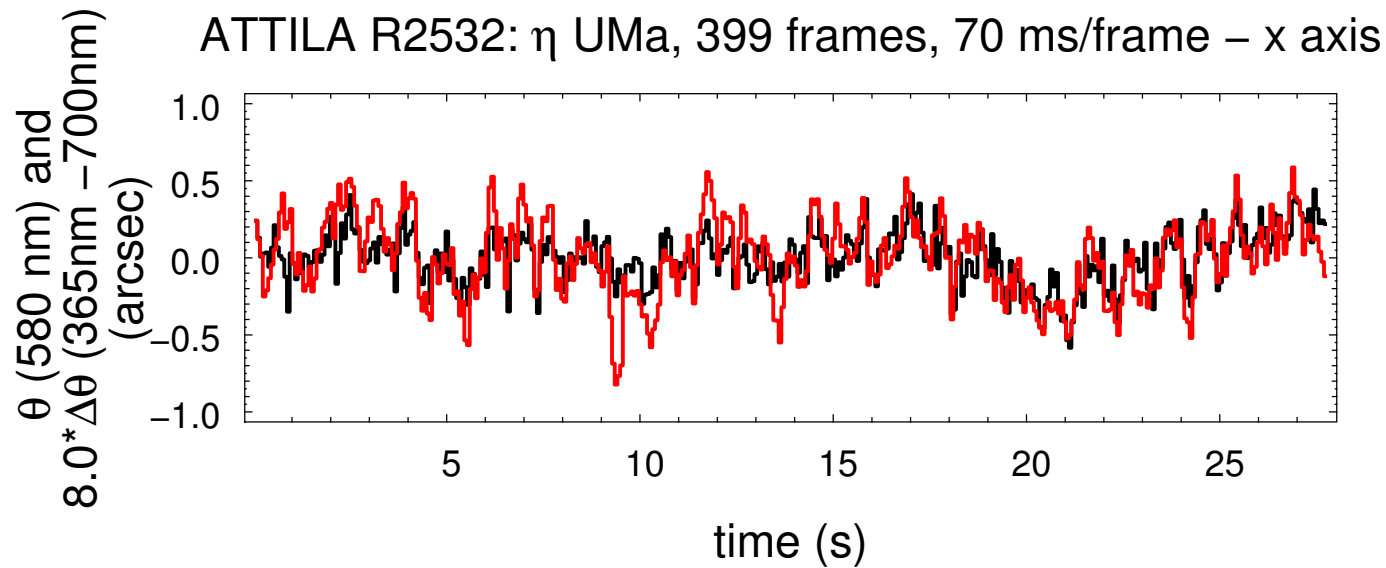
du démonstrateur "ELP-OA"

Précision de la mesure de la pente

1- Expérience ATTILA @ OHP

BUTS : Mesures de la pente depuis la pente différentielle avec une étoile pour mimer l'étoile laser.

Instrument : Banc d'optique au foyer coudé du télescope de 1.52m de l'OHP ; 4 canaux spectraux (UV à rouge) ; détecteur EMCCD "Cascade" ROPER.



Observations : 1.52m telescope @ Observatoire de Haute-Provence

Rouge : pente mesurée à 580 nm ($\theta(580\text{nm})$). Noir :
pente restaurée depuis la pente différentielle entre
365 nm et 700 nm ($\text{Const} \times \Delta\theta(365\text{nm}-700\text{nm})$)

2- Algorithmes

Échantillonnage des images : Centre de gravité

$$\sigma(\theta) \propto fwhm_{0.33\mu\text{m}} / \sqrt{N_{0.33\mu\text{m}}} + fwhm_{2.3\mu\text{m}} / \sqrt{N_{2.33\mu\text{m}}} \quad (4)$$

Échantillonnage des images : intercorrélations.

Bénéficie de la forme des images

Échantillonnage des tavelures : Intercorrélations ou

restauration de phase (Rondeau et al., 2007). Ajustement

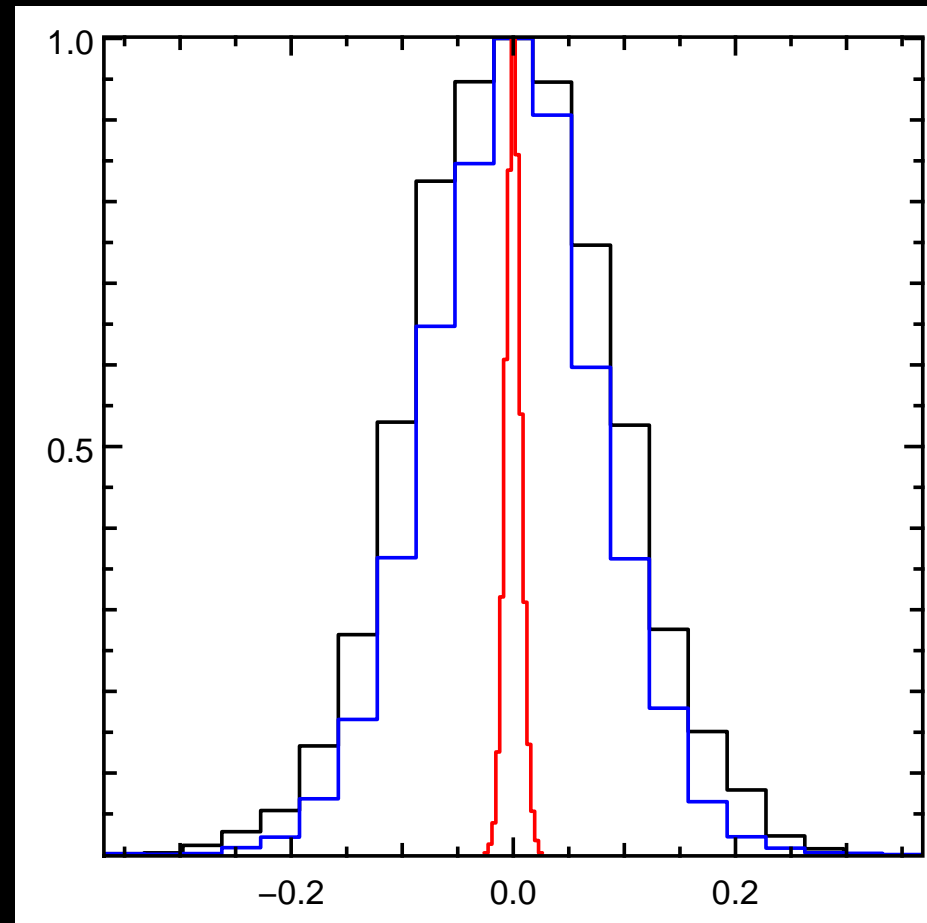
d'un modèle de l'image tavelée à celle observée \Rightarrow
carte de phase, via une optimisation non-linéaire du

MAP avec des gradients conjugués. Irwan & Lane

(1998) : $D/r_0 \lesssim 4$; ici : $D/r_0 \lesssim 20$. Avec diversité

de phase chromatique : $D/r_0 \lesssim 70$. (Rondeau et al., 2008)

Critère de Cramér-Rao.



- NOIR centre de gravité
- BLEU interspectre
- ROUGE restauration de phase

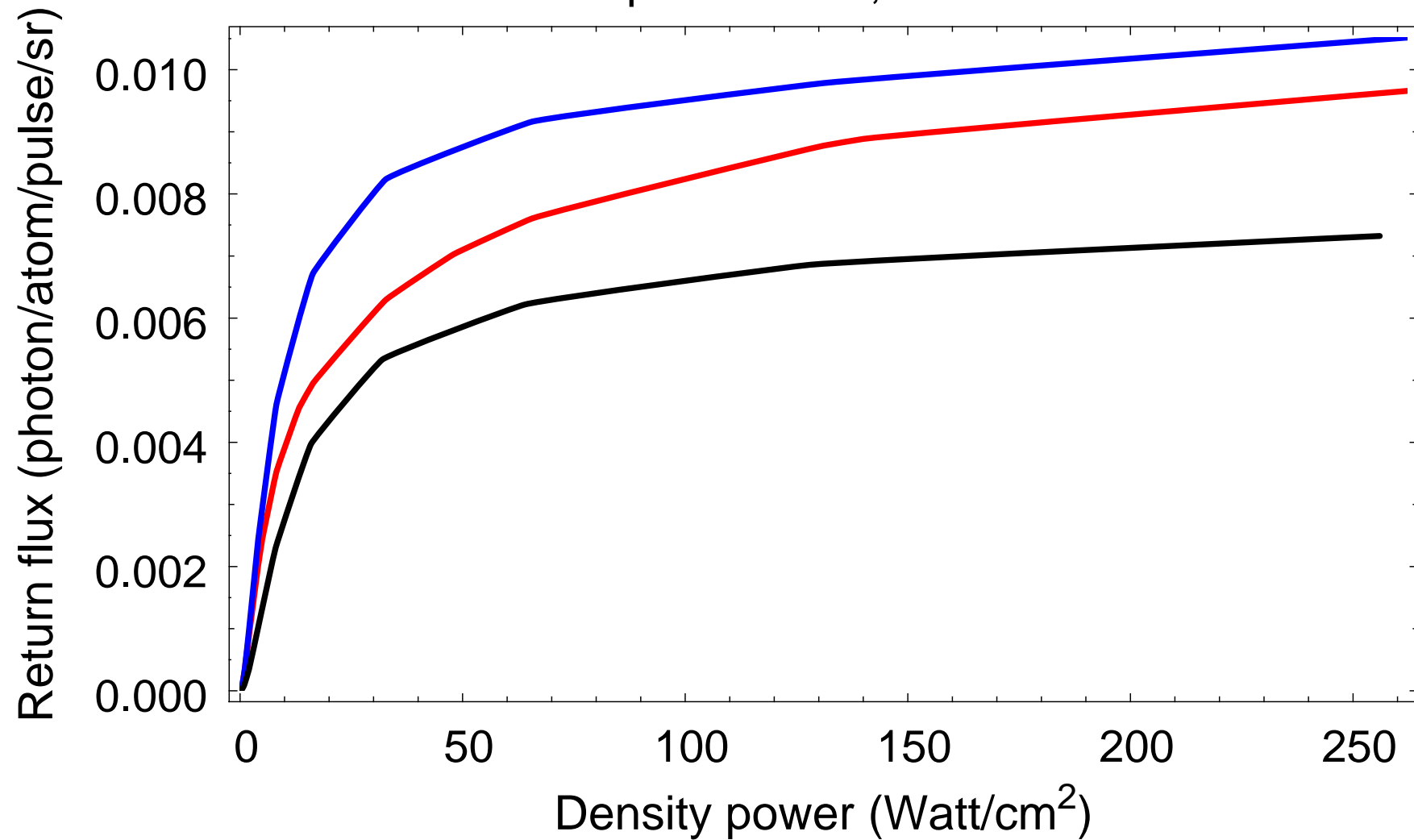
Modèles d'interaction laser-matière

Les équations d'état ne s'appliquent pas (e.g. Morris, 1994) à l'excitation pulsée avec modulation de phase.

Code BEACON/CEA pour excitation à 2 photons du Na (Bellanger et al., 2004) : matrice de densité + équations de Bloch optiques \Rightarrow nombre de photons émis par fluorescence depuis les niveaux $3P_{3/2}$, $4D_{5/2}$, $4P_{3/2}$ et $4S_{1/2}$.

2-photon excitation of Na

Gaussian pulse fwhm : Black = 50 ns, Red = 80 ns, Blue = 120ns
Both laser beams: circular polarization, 2 sine modulation functions



LE DÉMONSTRATEUR ELP-OA : BUT ELP-OA :

Correction de la pente \forall directions dans le
visible

LE DÉMONSTRATEUR ELP-OA : BUT ELP-OA :

Correction de la pente \forall directions dans le visible

COMMENT ?

- ▶ $\frac{\partial n}{\partial \lambda} = f(\lambda)$
- ▶ **excitation produisant une cascade à plusieurs λ**

LE DÉMONSTRATEUR ELP-OA : BUT ELP-OA :

Correction de la pente \forall directions dans le visible

COMMENT ?

- ▶ $\frac{\partial n}{\partial \lambda} = f(\lambda)$
- ▶ excitation produisant une cascade à plusieurs λ
- ▶ excitation à deux photons du niveau $4D_{5/2}$ de Na. Spectre $\subseteq [330 \text{ nm}, 2.34 \mu\text{m}]$

LE DÉMONSTRATEUR ELP-OA : BUT ELP-OA :

Correction de la pente \forall directions dans le visible

COMMENT ?

- ▶ $\frac{\partial n}{\partial \lambda} = f(\lambda)$
- ▶ excitation produisant une cascade à plusieurs λ
- ▶ excitation à deux photons du niveau $4D_{5/2}$ de Na. Spectre $\subseteq [330 \text{ nm}, 2.34 \mu\text{m}]$
- ▶ 2 lasers type séparation isotopique du CEA. Nominal : $\langle P \rangle = 2 \times 34 \text{ W}$

LE DÉMONSTRATEUR ELP-OA : BUT ELP-OA :

Correction de la pente \forall directions dans le visible

COMMENT ?

- ▶ $\frac{\partial n}{\partial \lambda} = f(\lambda)$
- ▶ excitation produisant une cascade à plusieurs λ
- ▶ excitation à deux photons du niveau $4D_{5/2}$ de Na. Spectre $\subseteq [330 \text{ nm}, 2.34 \mu\text{m}]$
- ▶ 2 lasers type séparation isotopique du CEA. Nominal : $\langle P \rangle = 2 \times 34 \text{ W}$
- ▶ mesure $\theta_{0.33} - \theta_{2.3} \propto \theta$

LE DÉMONSTRATEUR ELP-OA : BUT ELP-OA :

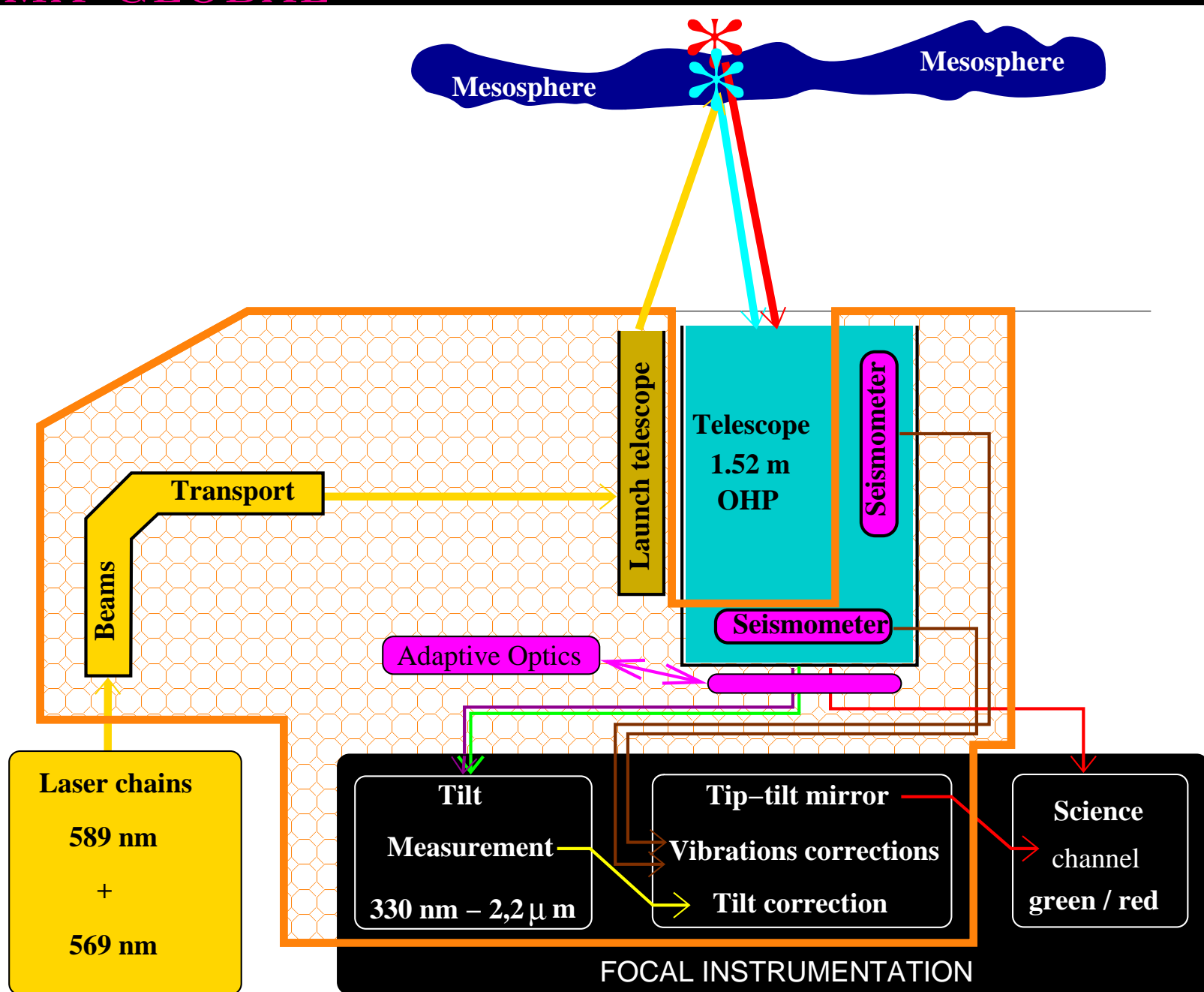
Correction de la pente \forall directions dans le visible

COMMENT ?

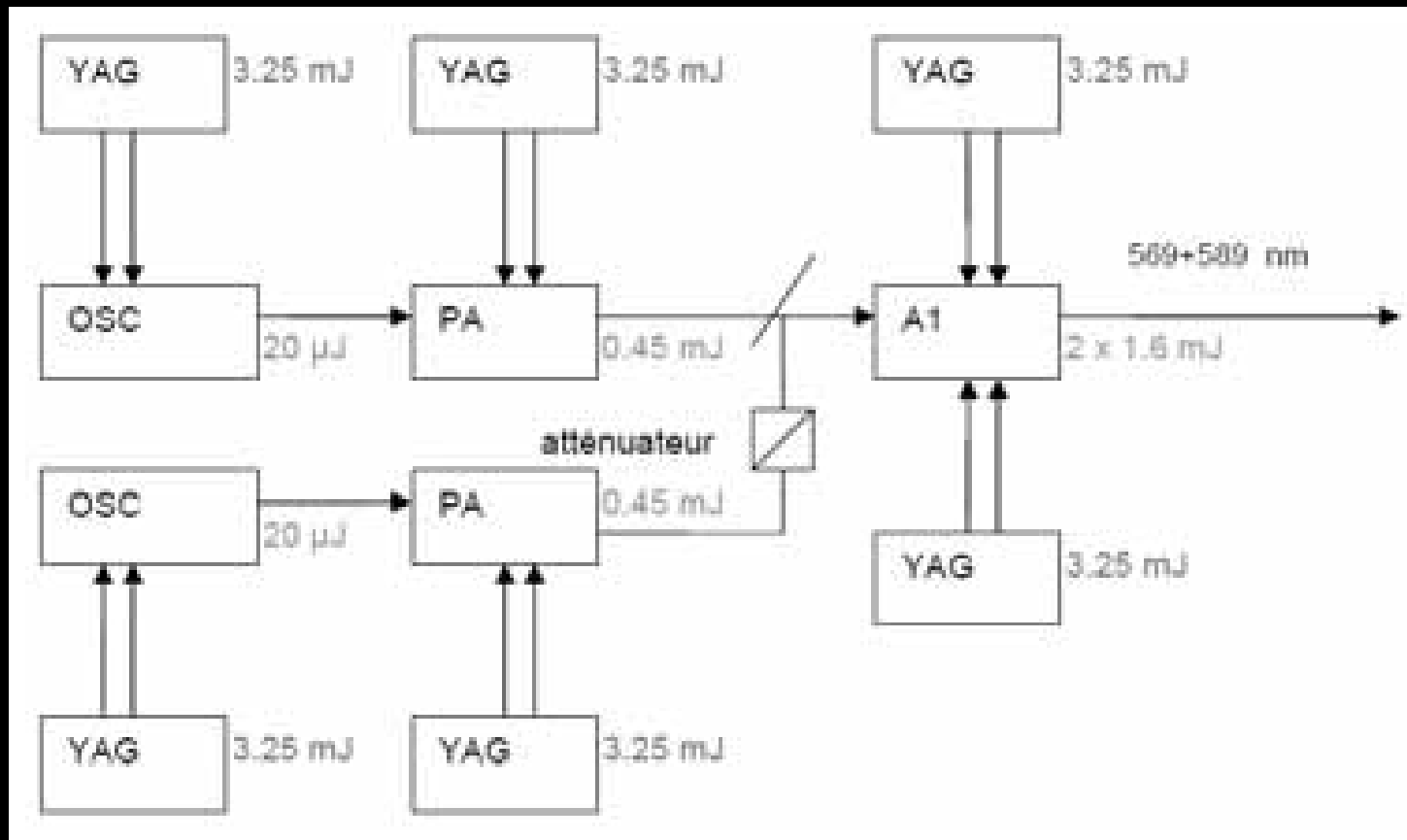
- ▶ $\frac{\partial n}{\partial \lambda} = f(\lambda)$
- ▶ excitation produisant une cascade à plusieurs λ
- ▶ excitation à deux photons du niveau $4D_{5/2}$ de Na. Spectre $\subseteq [330 \text{ nm}, 2.34 \mu\text{m}]$
- ▶ 2 lasers type séparation isotopique du CEA. Nominal : $\langle P \rangle = 2 \times 34 \text{ W}$
- ▶ mesure $\theta_{0.33} - \theta_{2.3} \propto \theta$
- ▶ + vibrations du télescope

Avant Projet Sommaire :

SCHÉMA GLOBAL



LES CHAÎNES LASER



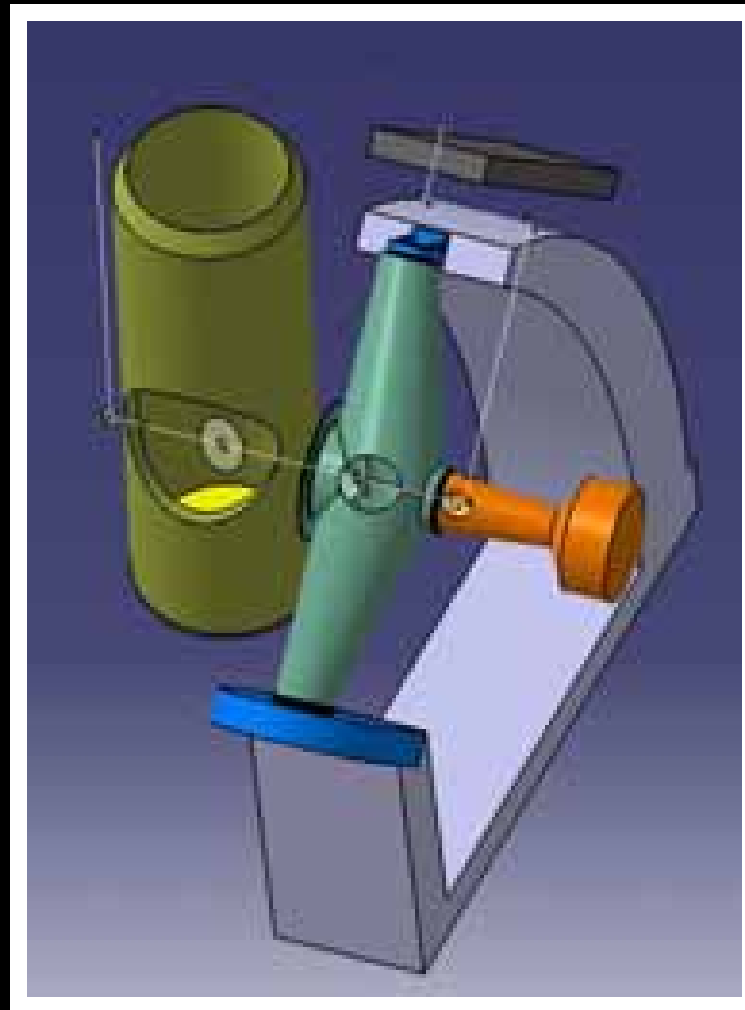
- ▶ $\langle \text{Puissance} \rangle$: 34 W ($\Rightarrow \approx 22$ W à la mésosphère)
- ▶ Durée d'impulsion : $\gtrsim 80$ ns
- ▶ Taux de répétition : 20 kHz
- ▶ Diamètre de sortie : ≈ 1 mm (5×7), à c
- ▶ Qualité de faisceau : limitée par la turbulence
- ▶ Rendement des préamplificateurs : 17%
- ▶ Rendement de l'amplificateur : 45%

Le télescope projecteur

Optimisation du diamètre d en termes de flux retourné (sans super-résolution) :

$$d < D \times \lambda_{laser} / \max(\lambda_{return}) \approx 0.4m \quad (5)$$

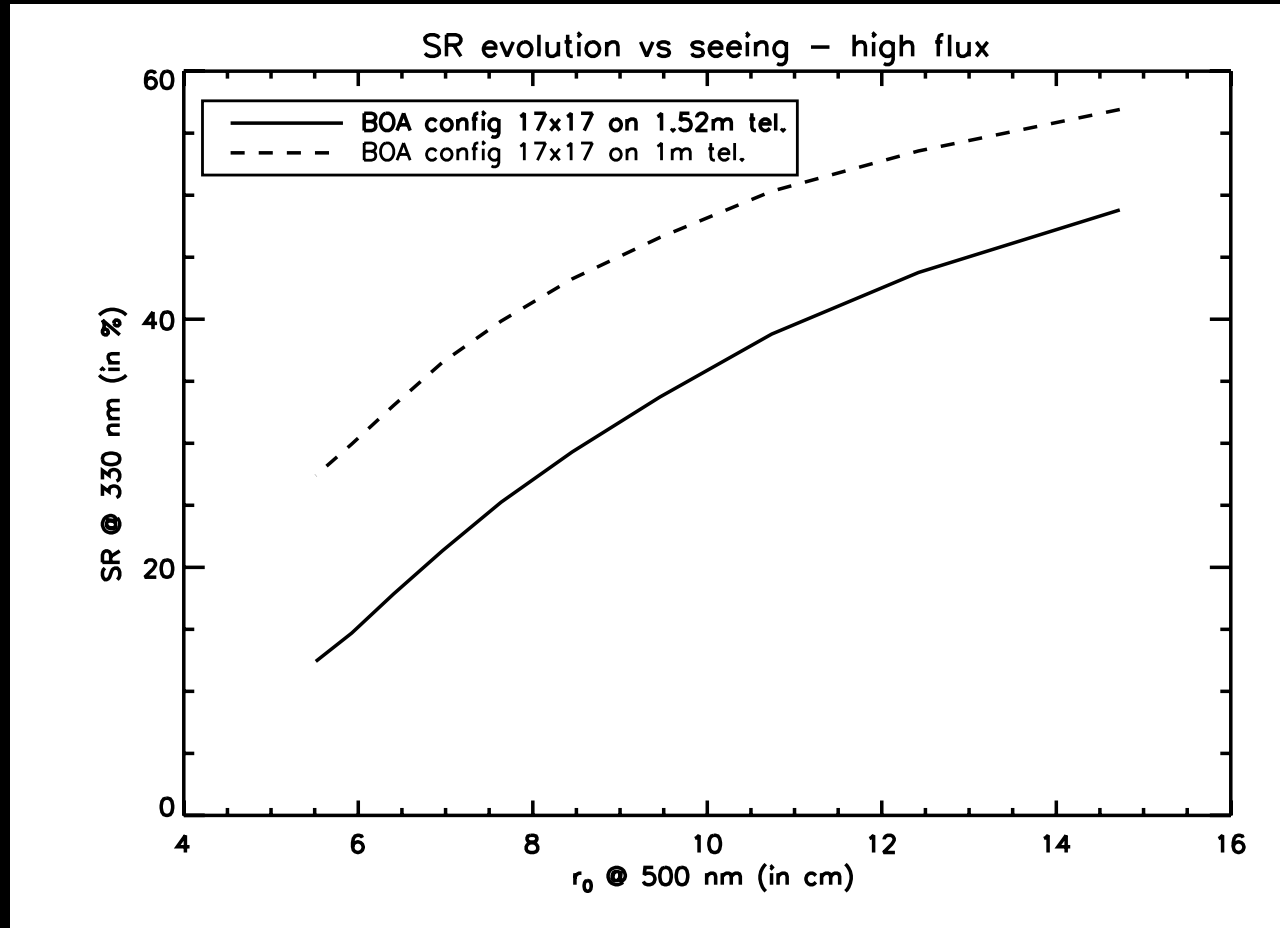
\implies tache laser tavelée.



L'inclinomètre

Optique adaptative BOA/ONERA (àc)

En cours : $10 \times 10 \rightarrow 17 \times 17$ actuators.



2 canaux : 330 nm et $2.2 + 2.34\mu\text{m}$ (2 détecteurs)
ou 589.6 nm

Équipements de diagnostics

- ▶ ρ , densité surfacique du Na, avec lidar et télescope de 1.2m de l'OHP
- ▶ GSM moniteur de turbulence de l'UNSA/Nice (r_0 , τ_0 , absorption, ...)

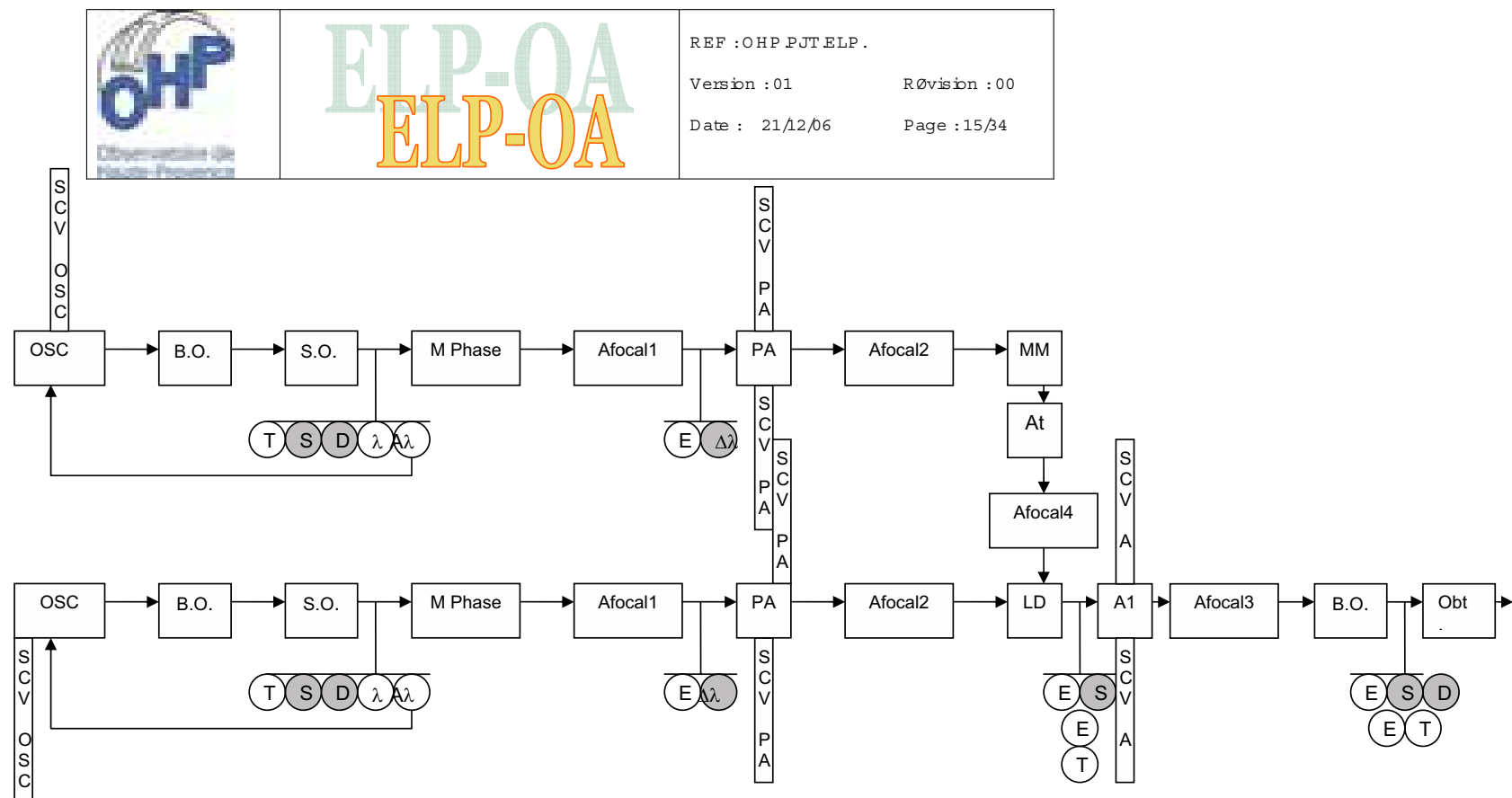


Figure 4. Schéma de la chaîne colorant instrumentée

Conclusions

Calendrier

- ▶ 1^{er} tir laser 589 nm à $z = 0$: fin 2008
- ▶ 1^{er} tir laser 589+569 nm à $z = 0$: fin 2009
- ▶ Observations avec système complet : 2010

Conclusions

Calendrier

- ▶ 1^{er} tir laser 589 nm à $z = 0$: fin 2008
- ▶ 1^{er} tir laser 589+569 nm à $z = 0$: fin 2009
- ▶ Observations avec système complet : 2010

D'autres débouchés :

- TÉLÉCOMMUNICATIONS INTERPLANÉTAIRES :
radio \Rightarrow optique
- DÉBRIS ORBITAUX : destruction

Conclusions

Calendrier

- ▶ 1^{er} tir laser 589 nm à $z = 0$: fin 2008
- ▶ 1^{er} tir laser 589+569 nm à $z = 0$: fin 2009
- ▶ Observations avec système complet : 2010

D'autres débouchés :

- **TÉLÉCOMMUNICATIONS INTERPLANÉTAIRES** :
radio \Rightarrow optique
- **DÉBRIS ORBITAUX** : destruction

Besoins futurs : laser tout solide, \forall étoile
laser

\Rightarrow Rôle R-I France dans FP7/EU.

Conclusions

Calendrier

- ▶ 1^{er} tir laser 589 nm à $z = 0$: fin 2008
- ▶ 1^{er} tir laser 589+569 nm à $z = 0$: fin 2009
- ▶ Observations avec système complet : 2010

D'autres débouchés :

- **TÉLÉCOMMUNICATIONS INTERPLANÉTAIRES :**
radio \Rightarrow optique
- **DÉBRIS ORBITAUX :** destruction

Besoins futurs : laser tout solide, \forall étoile
laser

\Rightarrow Rôle R-I France dans FP7/EU.

Remerciements : ANR, CNRS, DGA, PACA

