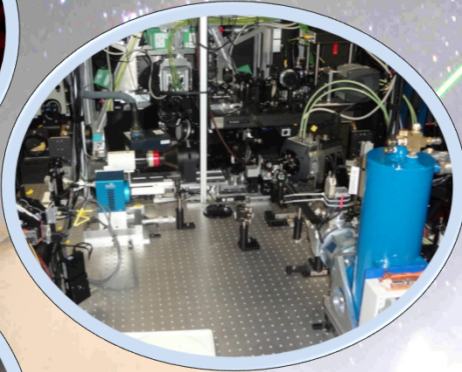


Olivier Martin

Démonstration sur le ciel de l'optique adaptative multi-objet avec étoiles lasers par CANARY



École doctorale ED 127, Université Paris-Diderot

Directeur de thèse : Gérard Rousset
Co-Directeur de thèse : Éric Gendron



Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

SOMMAIRE

1. Introduction

2. Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers

3. Modélisation d'un système de MOAO

4. Résultats statistiques sur le ciel

5. Conclusions

SOMMAIRE

1. Introduction

2. Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers

3. Modélisation d'un système de MOAO

4. Résultats statistiques sur le ciel

5. Conclusions

Introduction

Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers

Modélisation d'un système de MOAO

Résultats statistiques sur le ciel

Conclusions et Perspectives

Les enjeux astrophysiques de demain



Crédit : ESO

Champ de vue de 7' de diamètre

Observations multiplexées de 20 sources astrophysiques

30% de EE dans 75 mas

6 LGS et 5 NGS

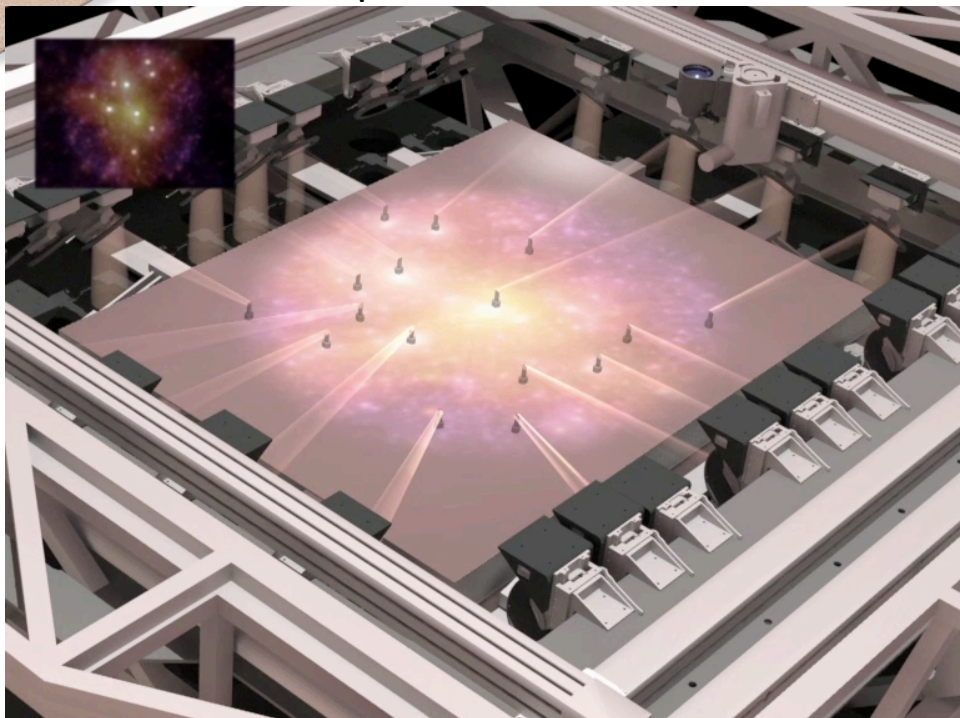
Formations et évolution des galaxies

EAGLE/MOSAIC :

Spectrographe multi-objet proche IR

Assisté par AO sur l'E-ELT

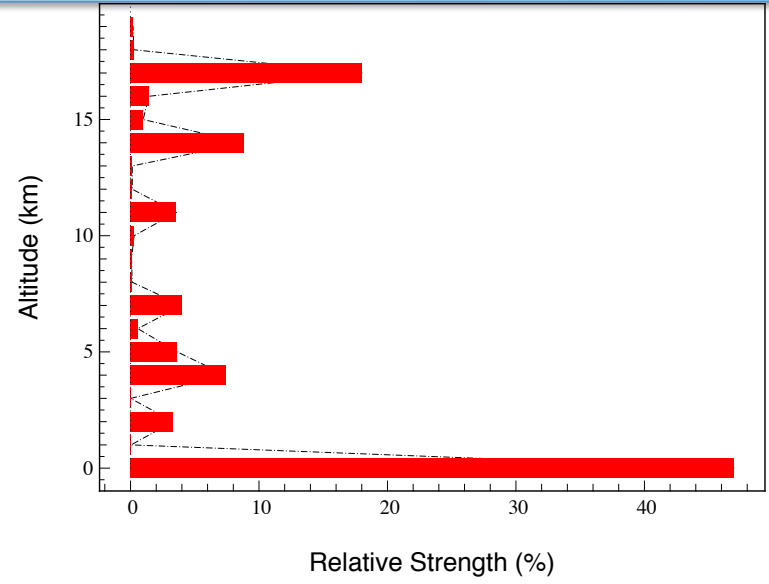
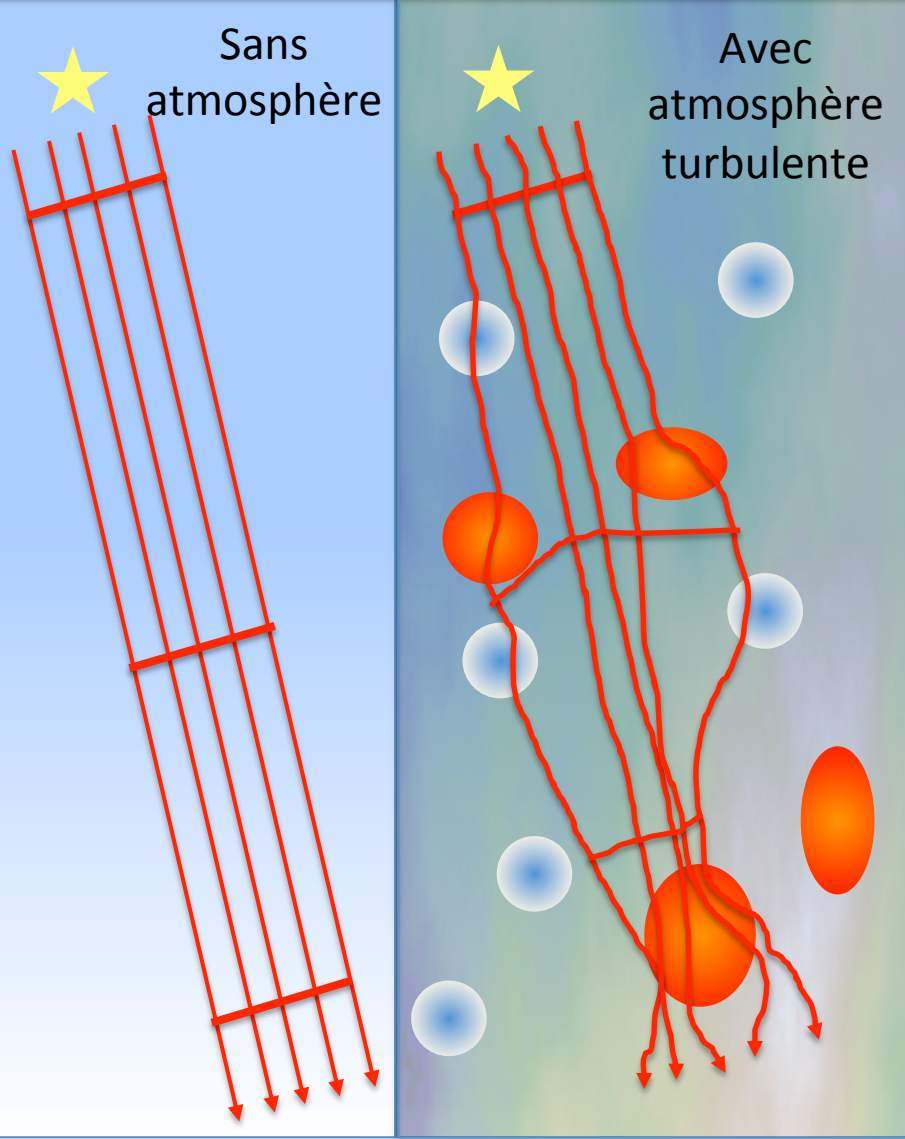
Étude en phase A: 2010



Introduction

- Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers
- Modélisation d'un système de MOAO
- Résultats statistiques sur le ciel
- Conclusions et Perspectives

La turbulence atmosphérique

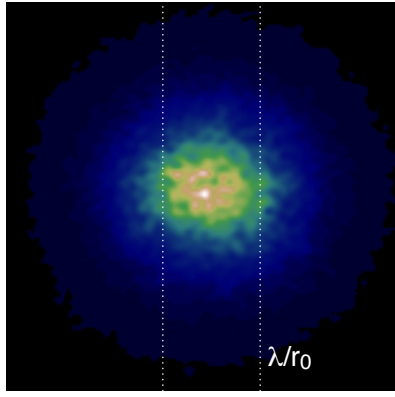


Paramètre de Fried r_0 / seeing
Échelle externe L_0

Spectre spatial des fluctuations de la phase donnée par Kolmogorov

Turbulence distribuée en altitude $C_n^2(h)$

Temps de corrélation/vitesse de vent



Introduction

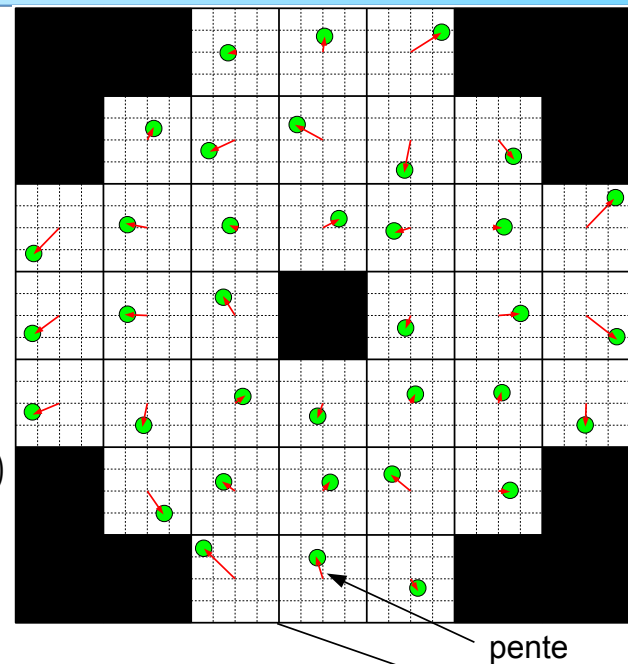
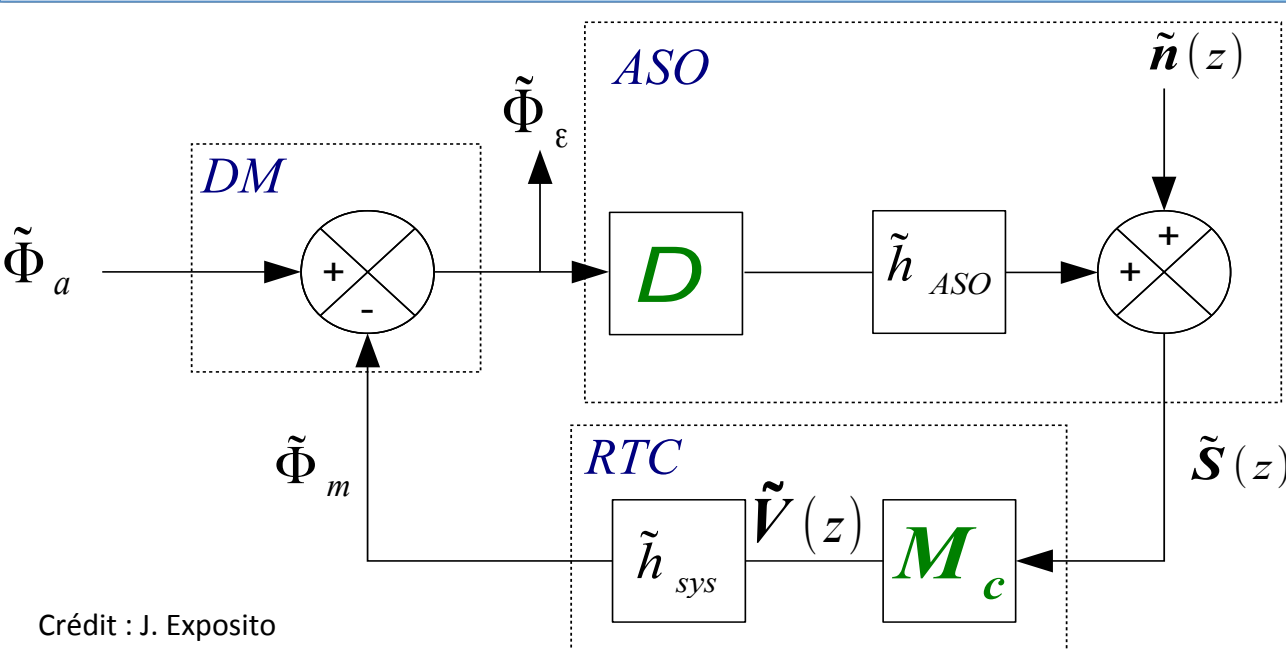
Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers

Modélisation d'un système de MOAO

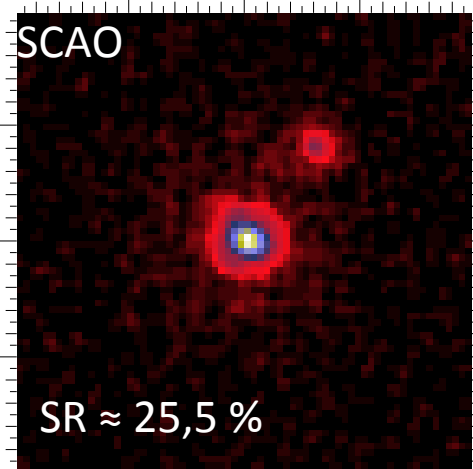
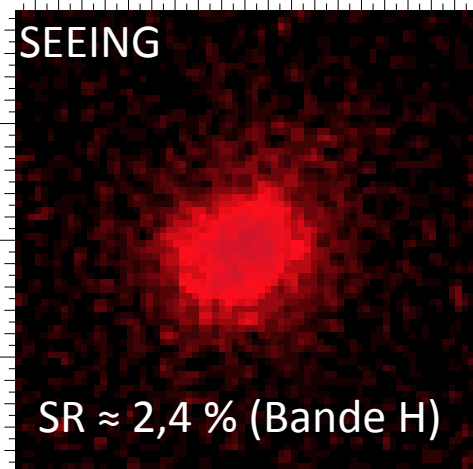
Résultats statistiques sur le ciel

Conclusions et Perspectives

L'optique adaptative classique (SCAO)



Crédit : J. Exposito



L'ASO mesure :

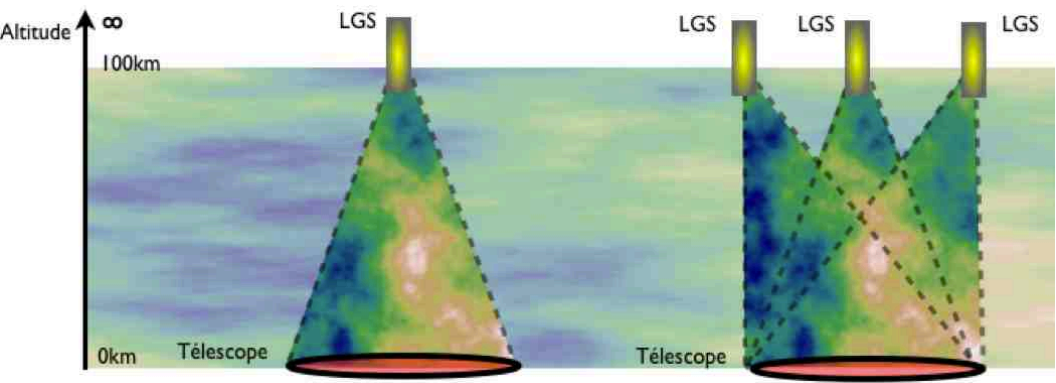
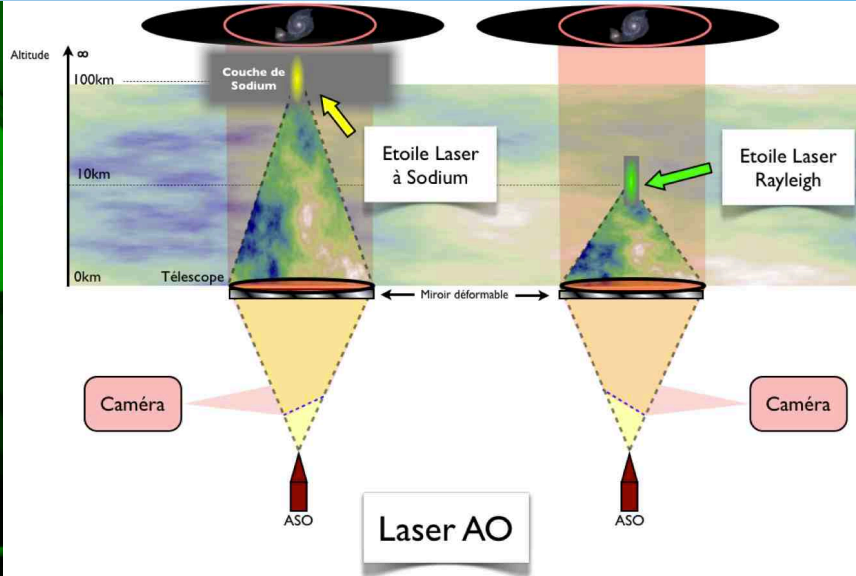
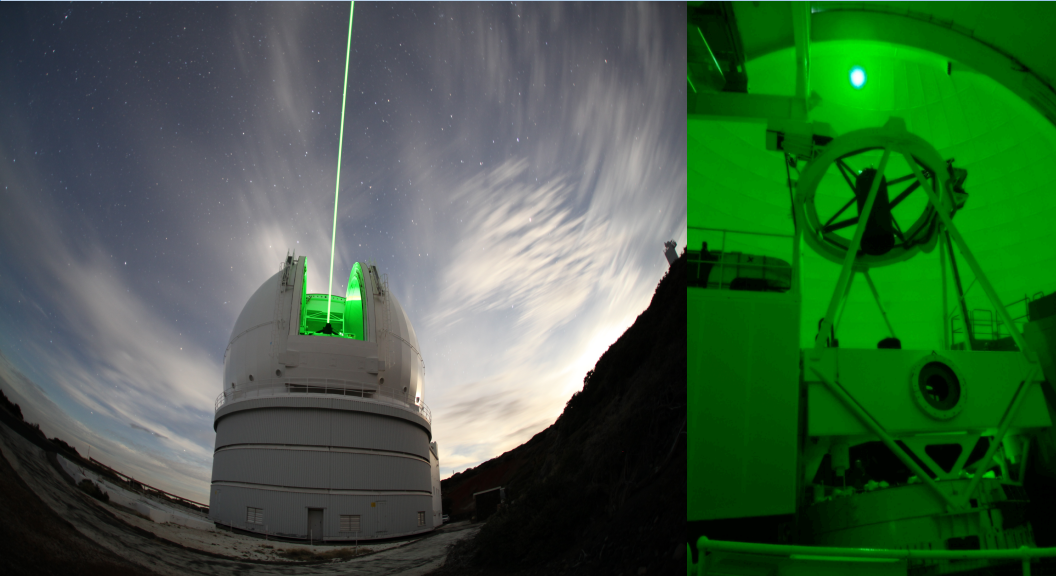
- modes de bas ordres de la turbulence
- repliement des modes de hauts ordres
- + contribution du bruit

Loi de commande intégrateur

Introduction

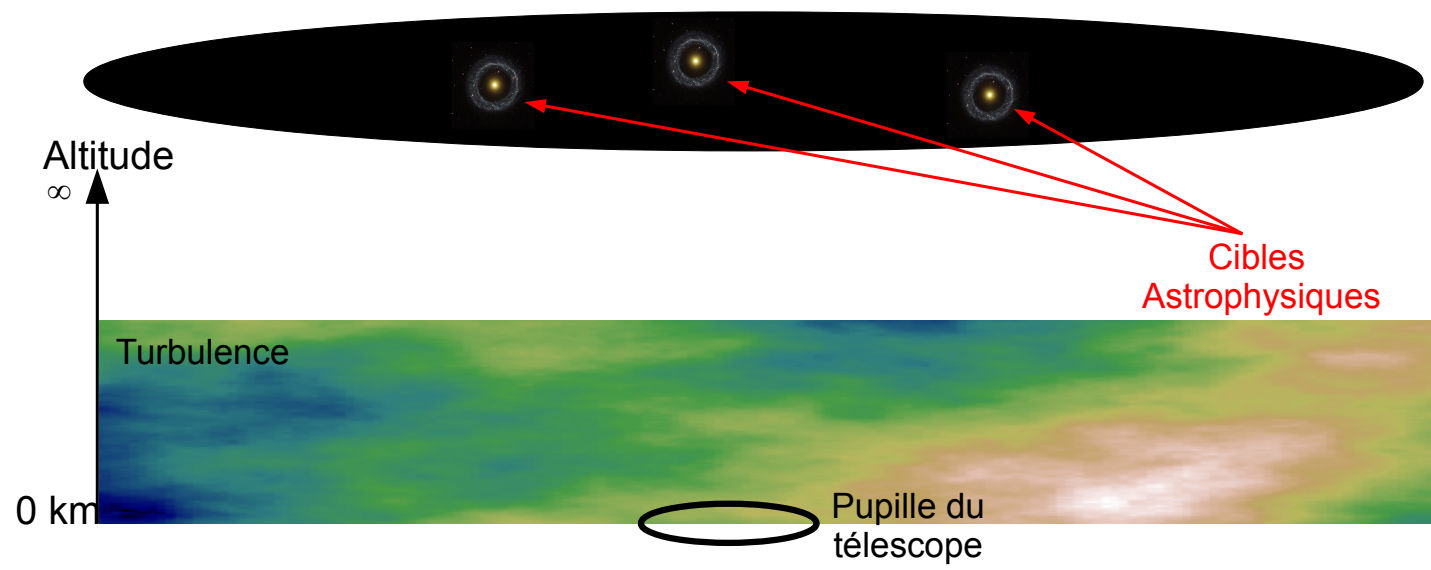
- Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers
- Modélisation d'un système de MOAO
- Résultats statistiques sur le ciel
- Conclusions et Perspectives

Les étoiles guides lasers



Compensation partielle de l'effet de cône avec plusieurs LGS

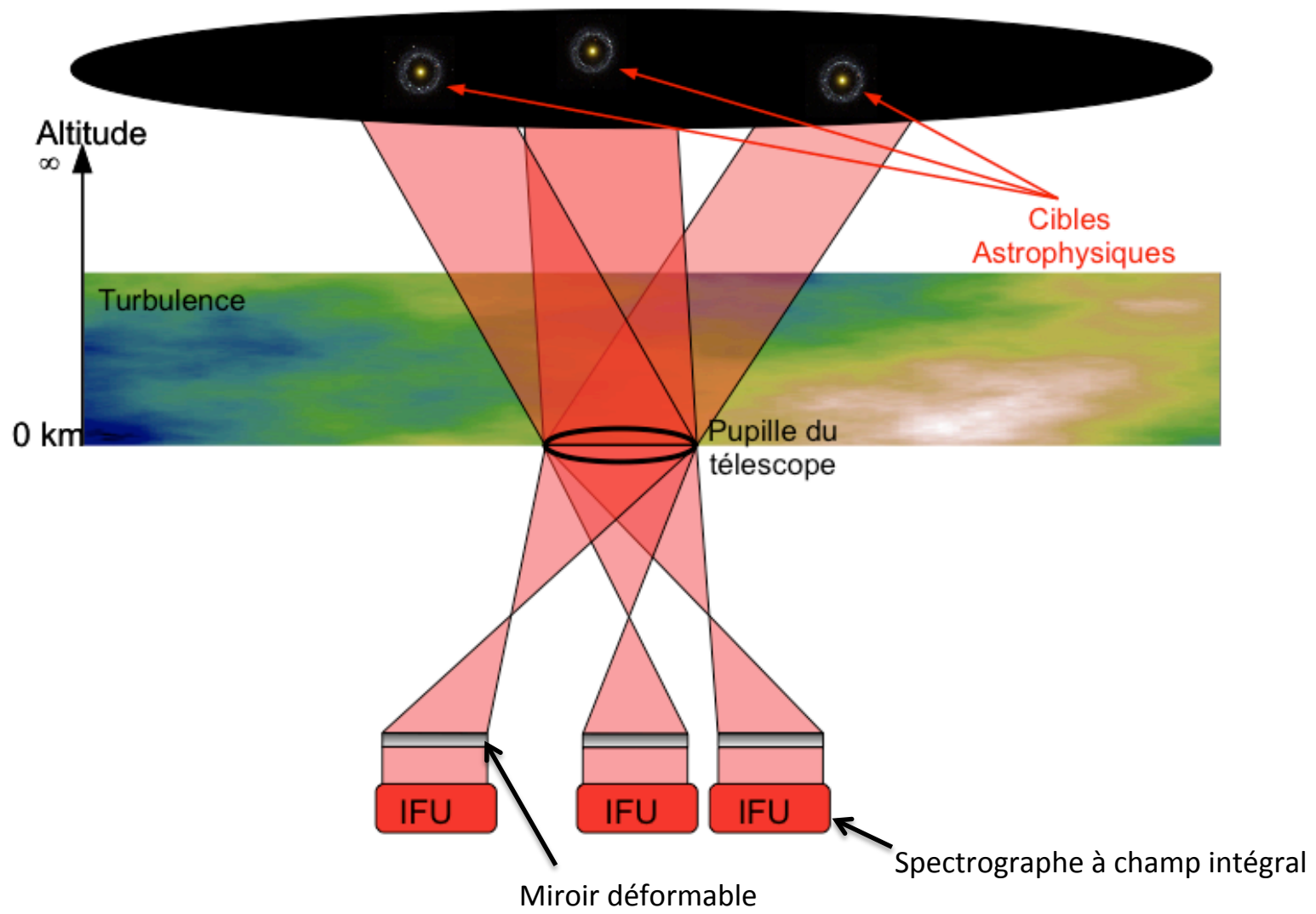
- Meilleure couverture du ciel
- Effet de cône** : turbulence non mesurée
- Indétermination de l'angle d'arrivée** du front d'onde sur la pupille
- Fluctuations de la densité de la couche de Sodium
(Elongation des spots, défocus)



Introduction

- Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers
- Modélisation d'un système de MOAO
- Résultats statistiques sur le ciel
- Conclusions et Perspectives

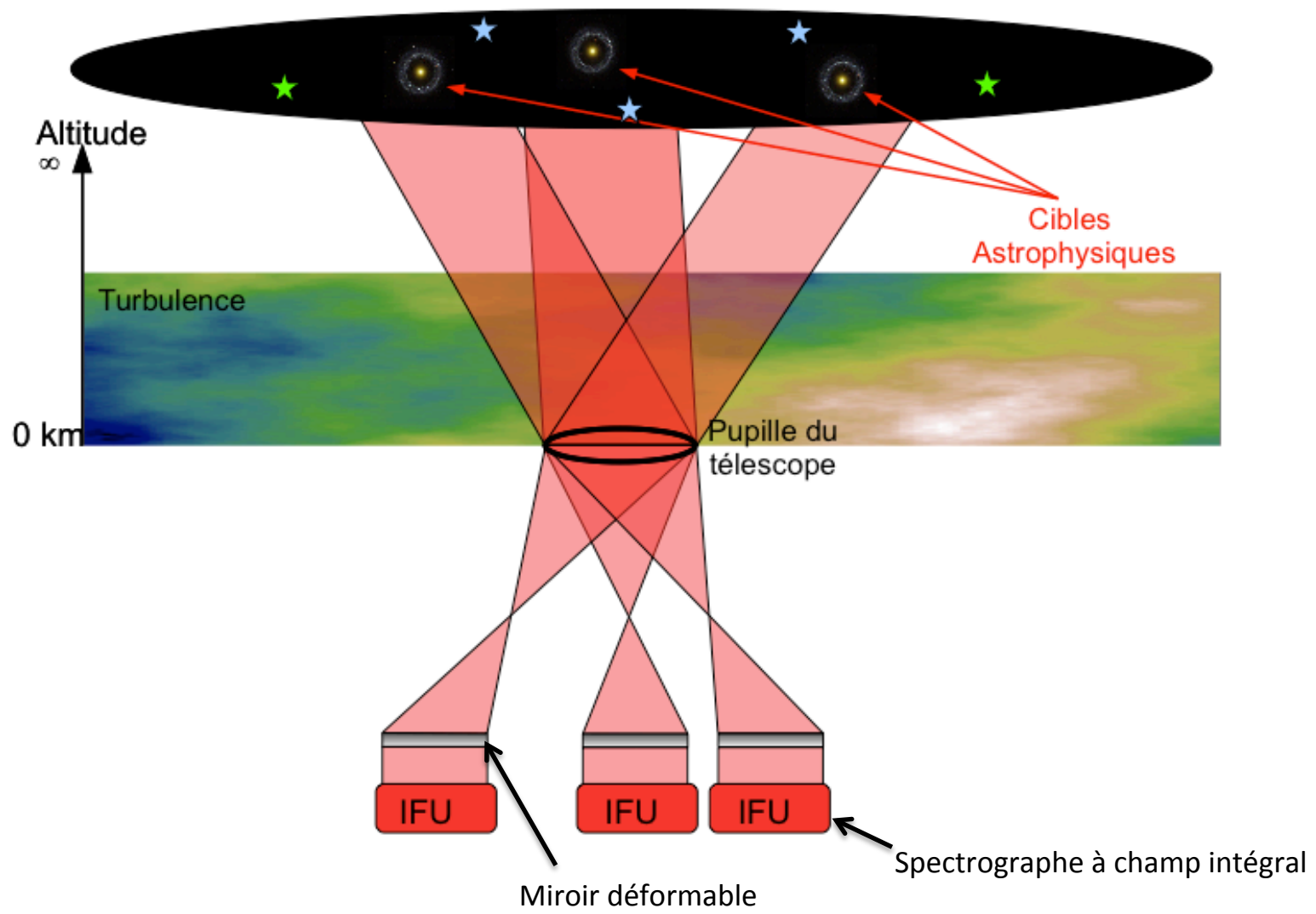
L'optique adaptative multi-objet (MOAO)



Introduction

- Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers
- Modélisation d'un système de MOAO
- Résultats statistiques sur le ciel
- Conclusions et Perspectives

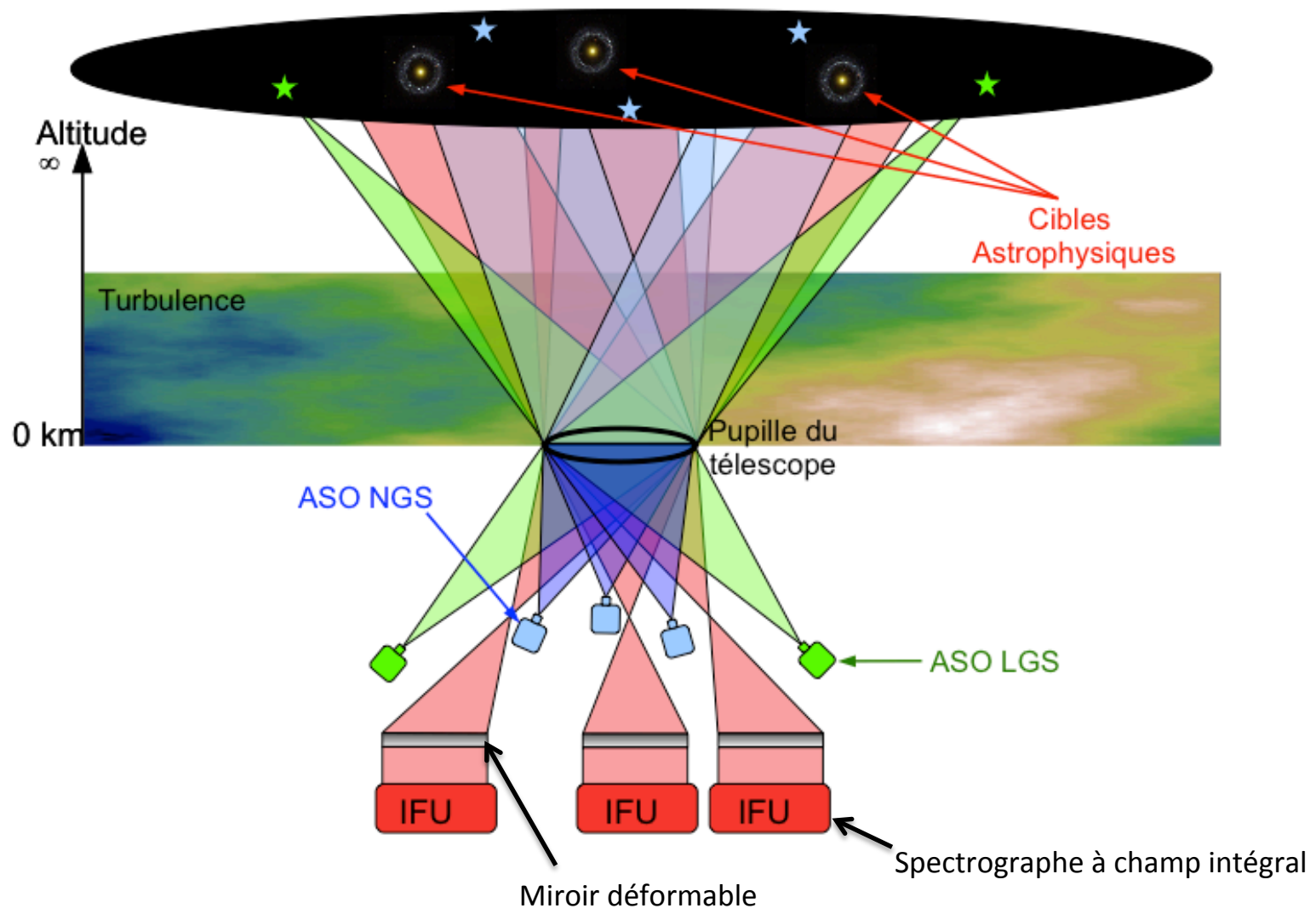
L'optique adaptative multi-objet (MOAO)



Introduction

- Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers
- Modélisation d'un système de MOAO
- Résultats statistiques sur le ciel
- Conclusions et Perspectives

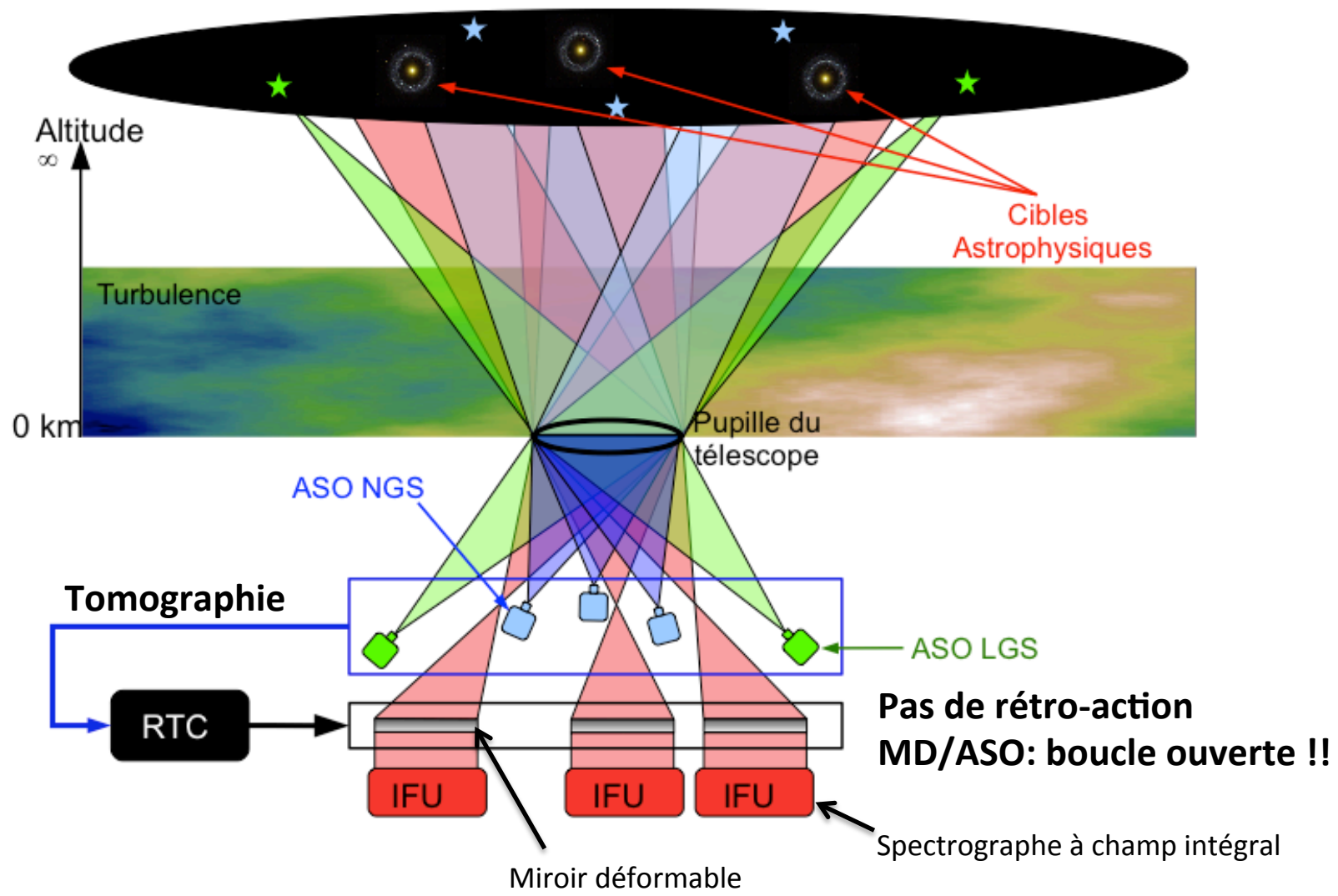
L'optique adaptative multi-objet (MOAO)



Introduction

- Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers
- Modélisation d'un système de MOAO
- Résultats statistiques sur le ciel
- Conclusions et Perspectives

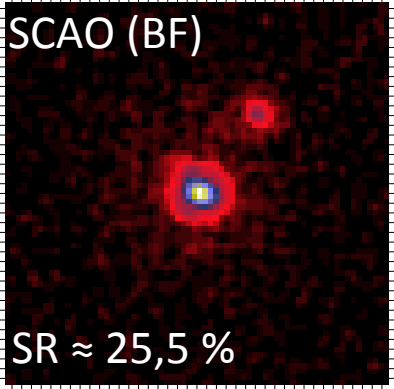
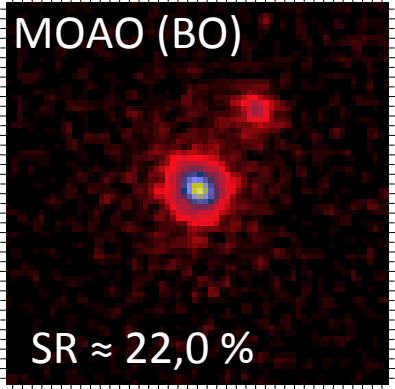
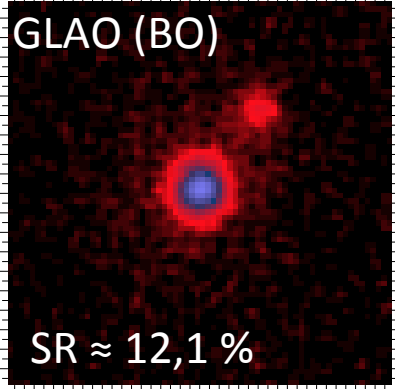
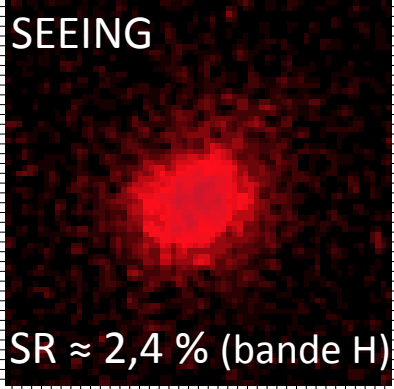
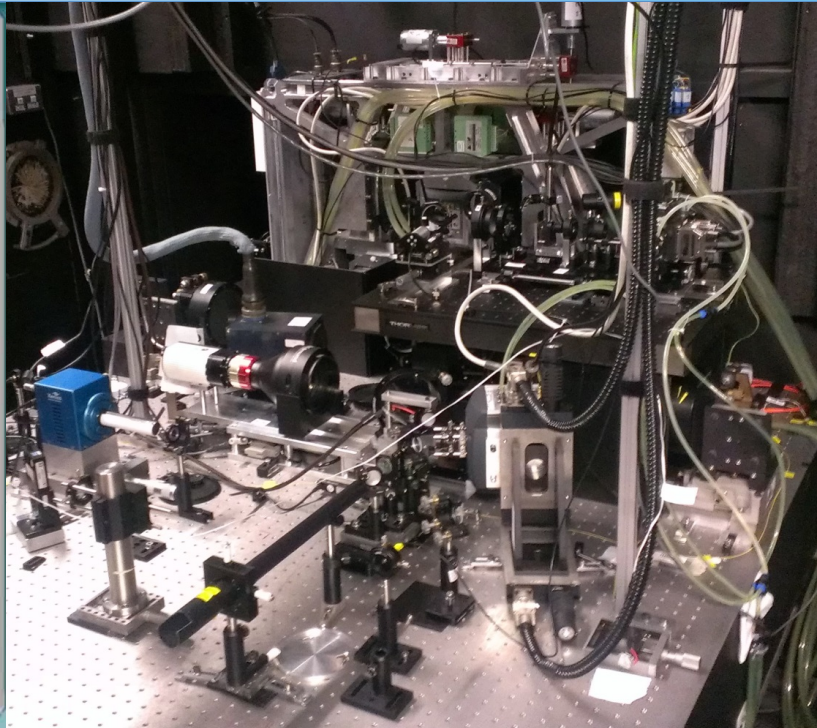
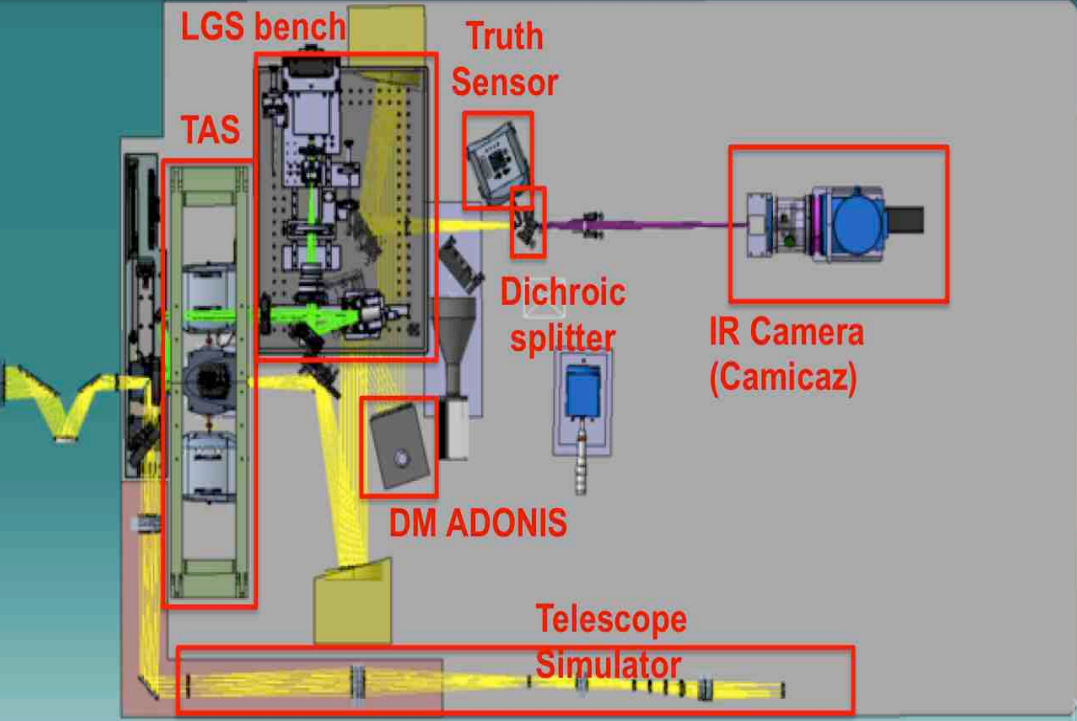
L'optique adaptative multi-objet (MOAO)



Introduction

- Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers
- Modélisation d'un système de MOAO
- Résultats statistiques sur le ciel
- Conclusions et Perspectives

L'instrument CANARY



SOMMAIRE

1. Introduction

2. Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers

3. Modélisation d'un système de MOAO

4. Résultats statistiques sur le ciel

5. Conclusions

La reconstruction tomographique MMSE avec CANARY

\mathbf{S}_β : Vecteur des mesures sur l'axe (TS)

\mathbf{S}_α : Vecteur des mesures hors-axes

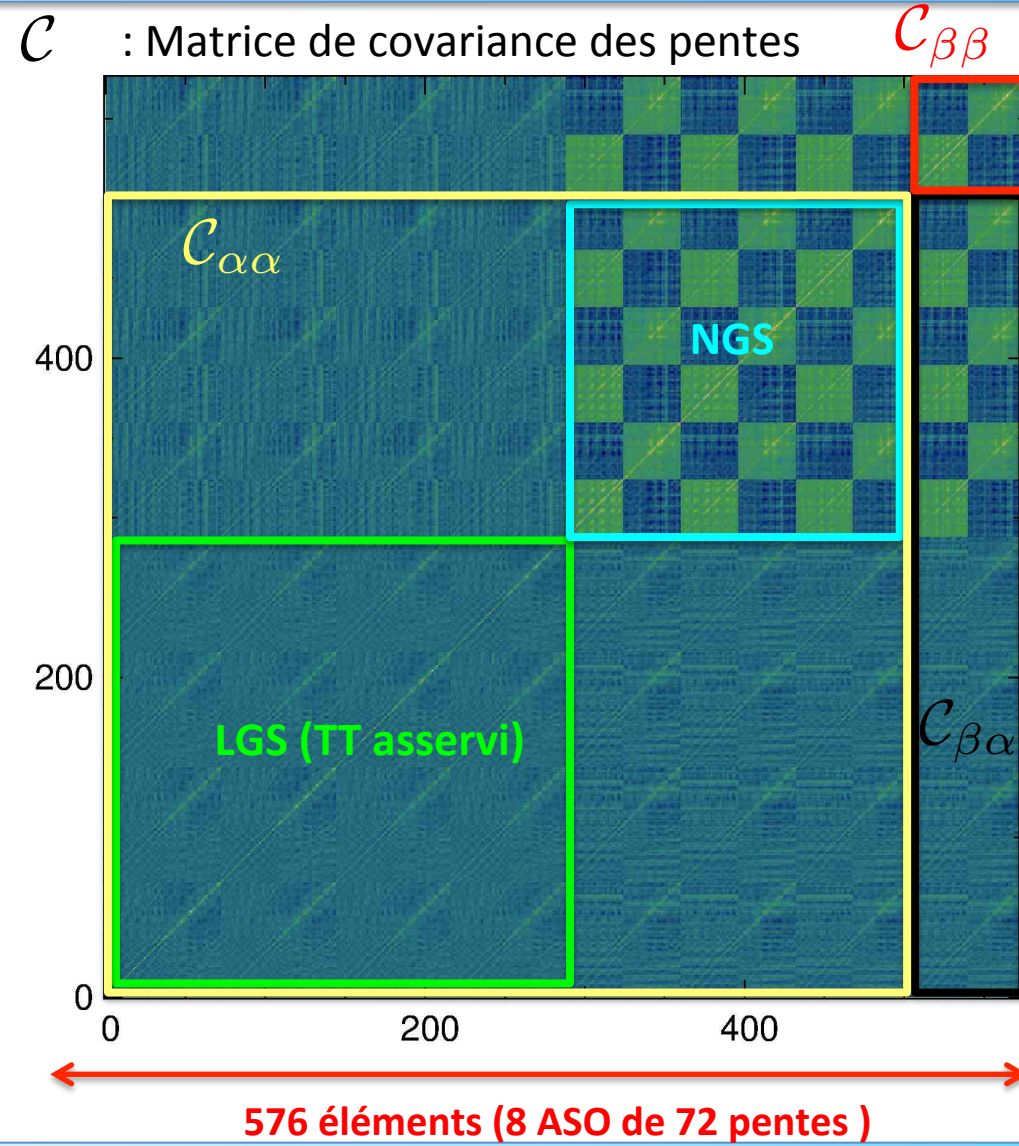
$$\varepsilon^2 = \mathbb{E} \left[\|\mathbf{S}_\beta - \mathbf{R}\mathbf{S}_\alpha\|^2 \right]$$

$$\mathbf{R} = \mathbb{E} [\mathbf{S}_\beta \mathbf{S}_\alpha^t] \mathbb{E} [\mathbf{S}_\alpha \mathbf{S}_\alpha^t]^{-1}$$

Matrice de projection $\mathbf{C}_{\beta\alpha}$ Matrice de pondération $\mathbf{C}_{\alpha\alpha}$

Estimation tomographique MMSE :

$$\hat{\mathbf{S}}_\beta = \mathbf{R}\mathbf{S}_\alpha$$



$$\mathbf{R} = \mathbb{E} [\mathbf{S}_\beta \mathbf{S}_\alpha^t] \mathbb{E} [\mathbf{S}_\alpha \mathbf{S}_\alpha^t]^{-1}$$

Problèmes :

- Le calcul du reconstruteur MMSE nécessite la covariance entre les ASO hors-axes et sur l'axe

=> **pas d'ASO sur l'axe sur l'E-ELT**

- Le calcul du reconstruteur MMSE nécessite des matrices de covariance statistiques

=> **les mesures acquises sur le ciel sont des réalisations particulières de la turbulence**

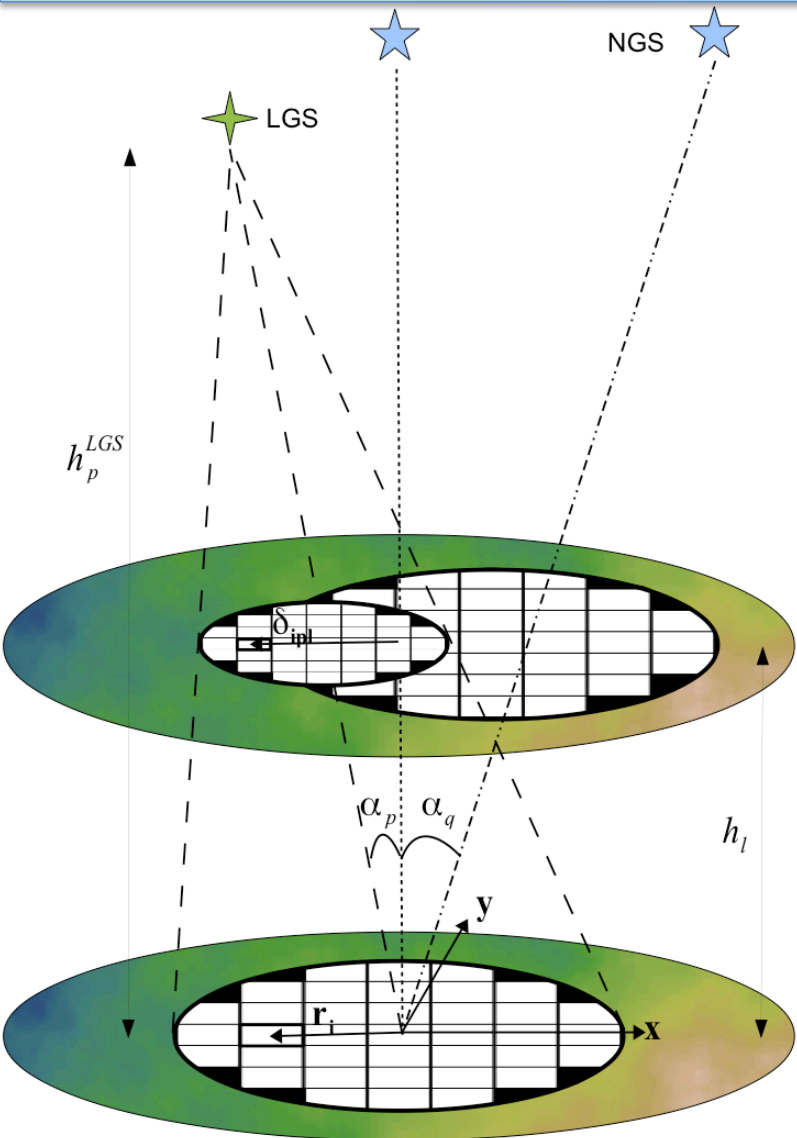


On ne peut pas directement utiliser les mesures pour calculer le reconstruteur



Besoin d'un modèle de la covariance des pentes !

Modèle de la covariance spatiale des pentes



Coordonnées des sous-pupilles : séparation des ASO, altitude, coordonnées dans le repère de l'ASO, altitude de focalisation des LGS, déviations



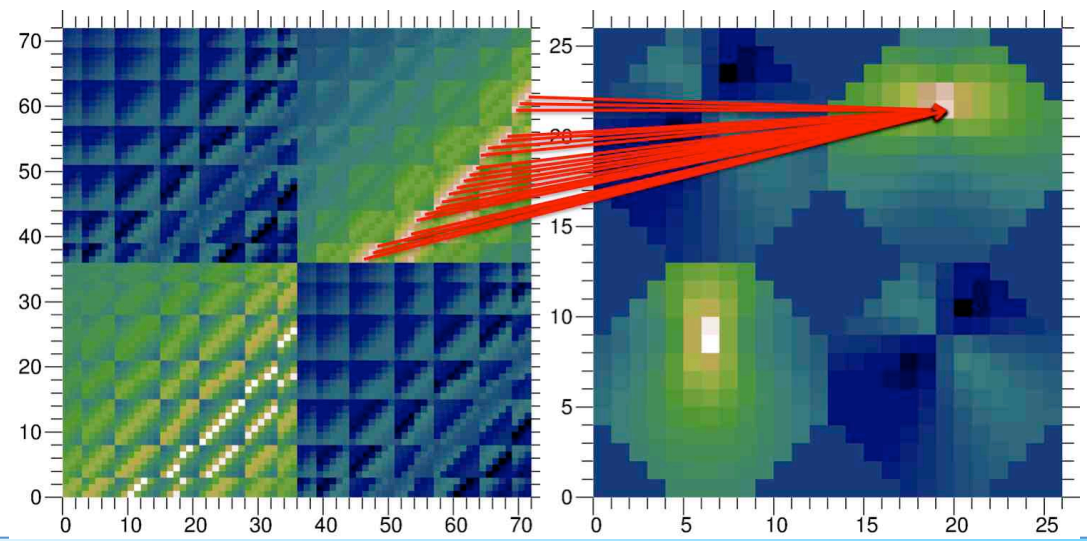
Fonctions de structure de phase à une altitude donnée : Séparation des ssp, r_0, L_0



Carte/Matrice de covariance à une altitude donnée : Matrice remplie avec les valeurs de covariance de chaque couple de sous-pupilles



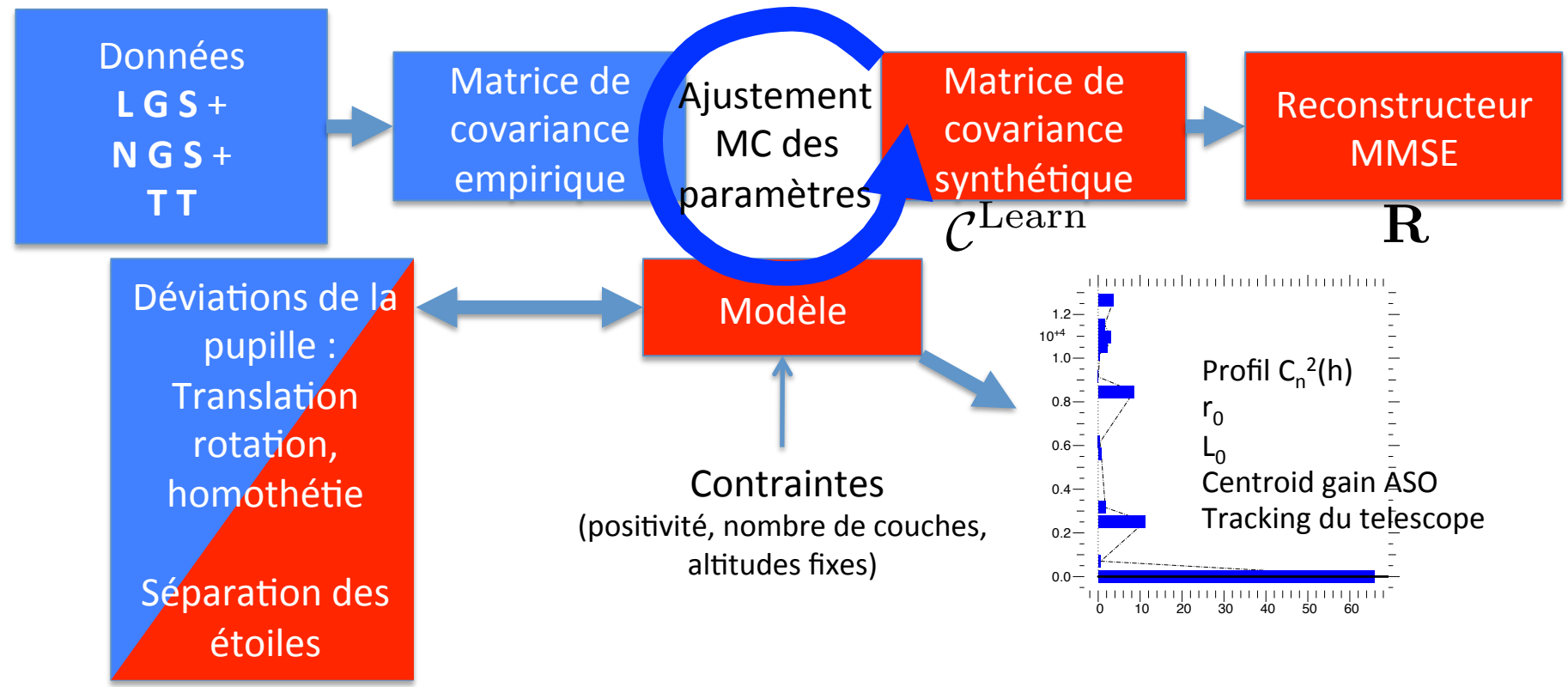
Indépendance statistique des couches turbulentes
 → somme sur les couches



Identification du reconstruteur sur le ciel par le Learn & Apply

Entrées

Sorties



$$R = C_{\beta\alpha}^{Learn} (C_{\alpha\alpha}^{Learn} + C_{\alpha\alpha}^{Noise})^{-1}$$

Erreur tomographique sur les pentes :

$$\varepsilon^2 = \mathbb{E} \left[\|\mathbf{S}_\beta - \mathbf{R}\mathbf{S}_\alpha\|^2 \right]$$

$$\varepsilon^2 = \text{tr}(\mathbf{C}_{\beta\beta}) - 2\text{tr}(\mathbf{C}_{\beta\alpha}\mathbf{R}^t) + \text{tr}(\mathbf{R}\mathbf{C}_{\alpha\alpha}\mathbf{R}^t)$$

Contribution des ASO dans les directions d'intérêts

Terme qui diminue l'erreur !!

Mesures des hors-axes, propagées à travers le reconstructeur

Erreur tomographique sur le front d'onde (nm rms) :

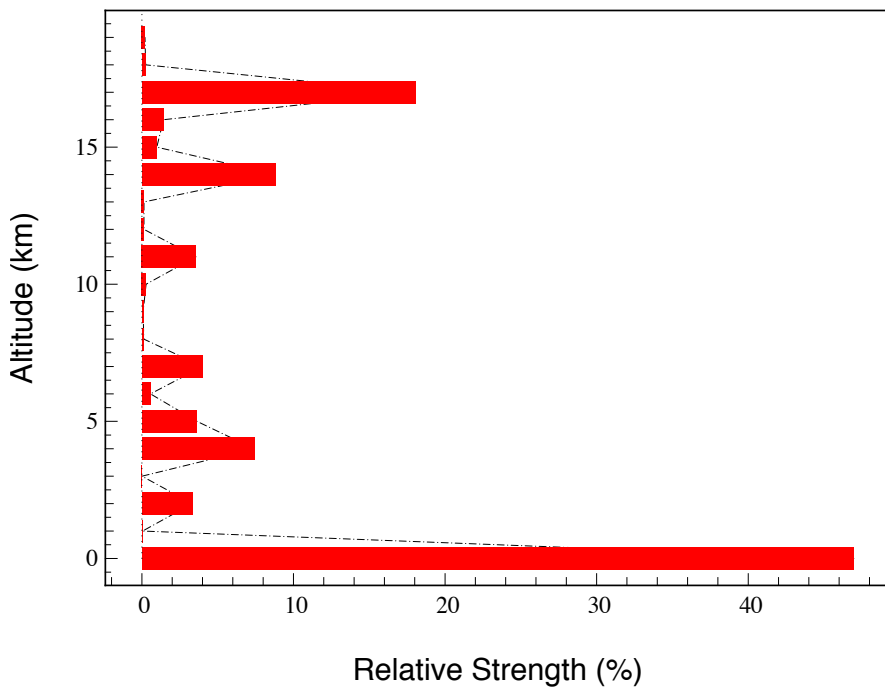
$$\sigma_{\text{TomotoTS}}^2 = \text{MSE}(\mathbf{C}, \mathbf{R})$$

Décomposition totale de l'erreur tomographique :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{TomotoTS}}^2 &= \sigma_{\parallel}^2 + \sigma_{\text{Alias}}^2 \quad \left. \vphantom{\sigma_{\text{Alias}}^2} \right\} \longrightarrow \text{Turbulence (bas ordres et repliement)} \\
 &+ \sigma_{\text{NoiseTS}}^2 + \sigma_{\text{NoiseTomo}}^2 \quad \left. \vphantom{\sigma_{\text{NoiseTomo}}^2} \right\} \longrightarrow \text{Bruit TS + bruit hors-axes} \\
 &+ \sigma_w^2 + \Delta_{\text{model}} \quad \left. \vphantom{\Delta_{\text{model}}} \right\} \longrightarrow \text{Contribution de la convergence} \\
 &\hspace{15em} \text{+ erreur de modélisation de la} \\
 &\hspace{15em} \text{covariance spatiale (couches non} \\
 &\hspace{15em} \text{vues, étalonnage, approximations)}
 \end{aligned}$$

Erreur tomographique vue par la caméra IR sur l'axe de CANARY:

$$\sigma_{\text{TomotoIR}}^2 = \sigma_{\parallel}^2 + \sigma_{\text{AliasIR}}^2 + \Delta_{\text{model}} (+\sigma_{\text{NoiseTomo}}^2)$$



Indépendance des couches turbulentes :

$$\sigma_{||}^2 = \sum_{l=1}^{n_1} \sigma_{||}^2(h_l)$$

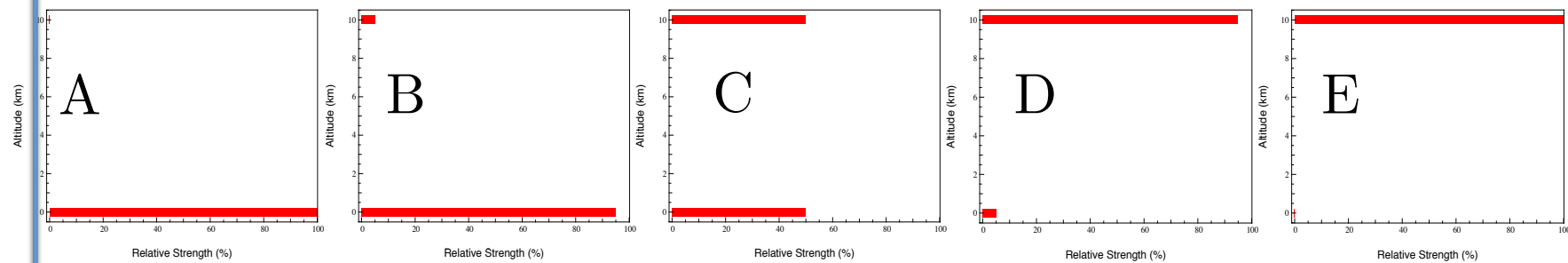
$$\sigma_{\text{Alias}}^2 = \sum_{l=1}^{n_1} \sigma_{\text{Alias}}^2(h_l)$$

La décomposition de l'erreur tomographique par couche donne une visualisation des couches turbulentes qui limitent la performance tomographique

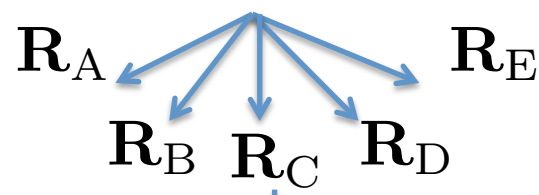
Performance des reconSTRUCTEURS MMSE avec l'altitude des couches turbulentes ?

Génération d'une matrice de covariance monocouche et sans bruit $\mathcal{C}(h_l)$

Génération de reconstituteur 2 couches (0 et 10 km) avec des pondérations relatives différentes + reconstituteur optimal

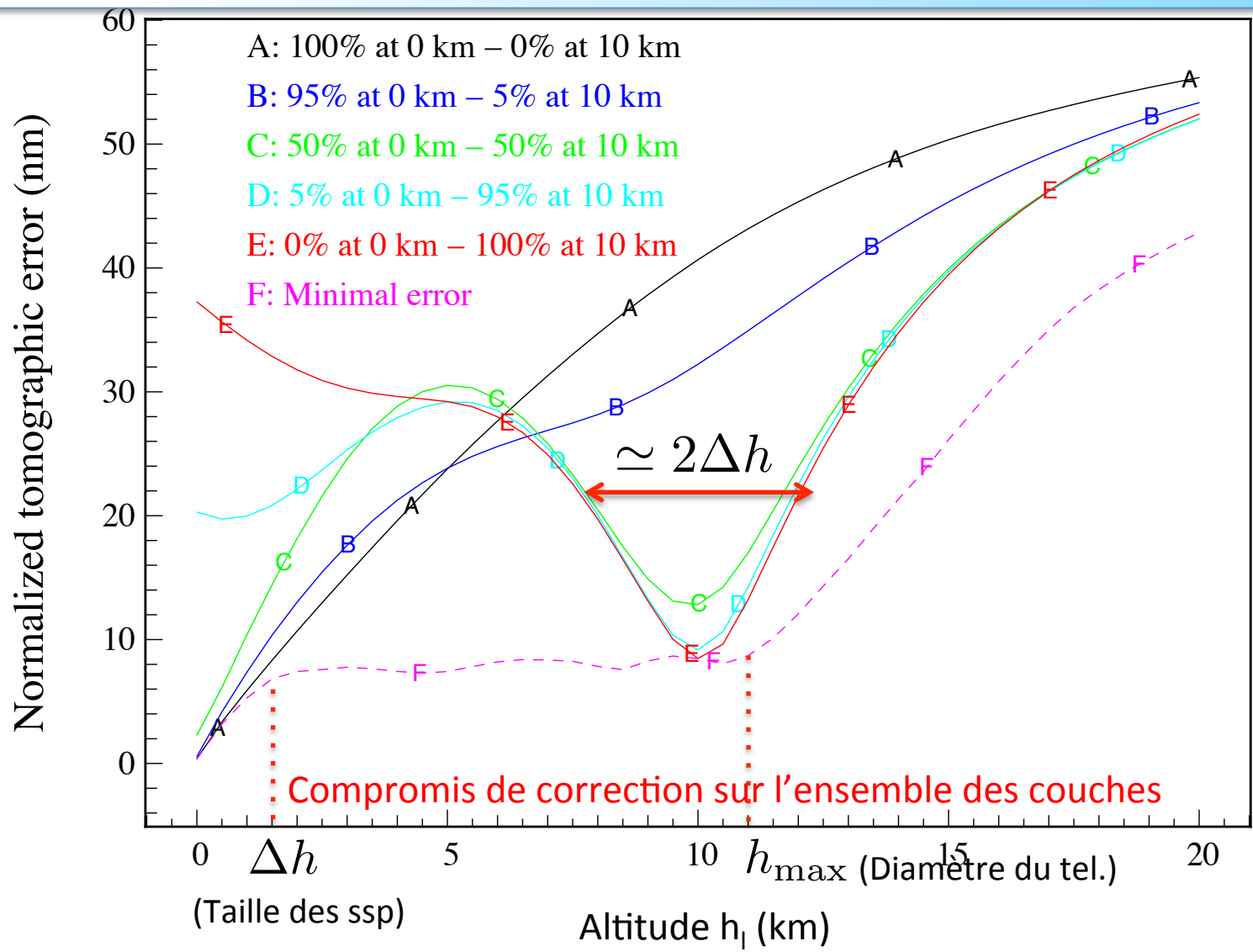


$$\mathbf{R}^{\text{opt}} = \mathcal{C}_{\beta\alpha}(h_l) (\mathcal{C}_{\alpha\alpha}(h_l))^{-1}$$



$$\sigma_A^2 = \text{MSE}(\mathcal{C}(h_l), \mathbf{R}_A)$$

Compromis performance/robustesse des reconstructeurs MMSE



Résolution tomographique :

$$\Delta h \simeq \frac{d}{\alpha_{\max}} \rightarrow \begin{array}{l} \approx 1500 \text{ m sur CANARY} \\ \approx 300 \text{ m sur MOSAIC } (\alpha_{\max} \approx 7,5') \end{array}$$

Altitude maximale :

$$h_{\max} \simeq \frac{D}{\alpha_{\min}} \rightarrow \begin{array}{l} \approx 15\text{-}20 \text{ km sur CANARY} \\ \approx 30 \text{ km sur MOSAIC si } \alpha_{\min} \approx 5' \end{array}$$

Turbulence essentiellement comprise
entre 0 et ≈ 25 km



**il faut identifier au minimum de 30
à 40 couches turbulentes sur l'E-ELT**

- ✧ La reconstruction MMSE requiert un **modèle théorique** de la covariance spatiale dont les paramètres sont **identifiés sur le ciel** avec le L&A

- ✧ **Opérateur MSE** pour calculer les erreurs tomographiques vues par le TS \neq erreurs tomo. vues par la camera IR \rightarrow **décomposition** de l'erreur tomographique

- ✧ Tomographie efficace de **0** à h_{\max} et **compromis performance/robustesse** aux non stationnarités du profil turbulent des reconstructeurs MMSE \rightarrow **identification tous les $2\Delta h$**

SOMMAIRE

1. Introduction

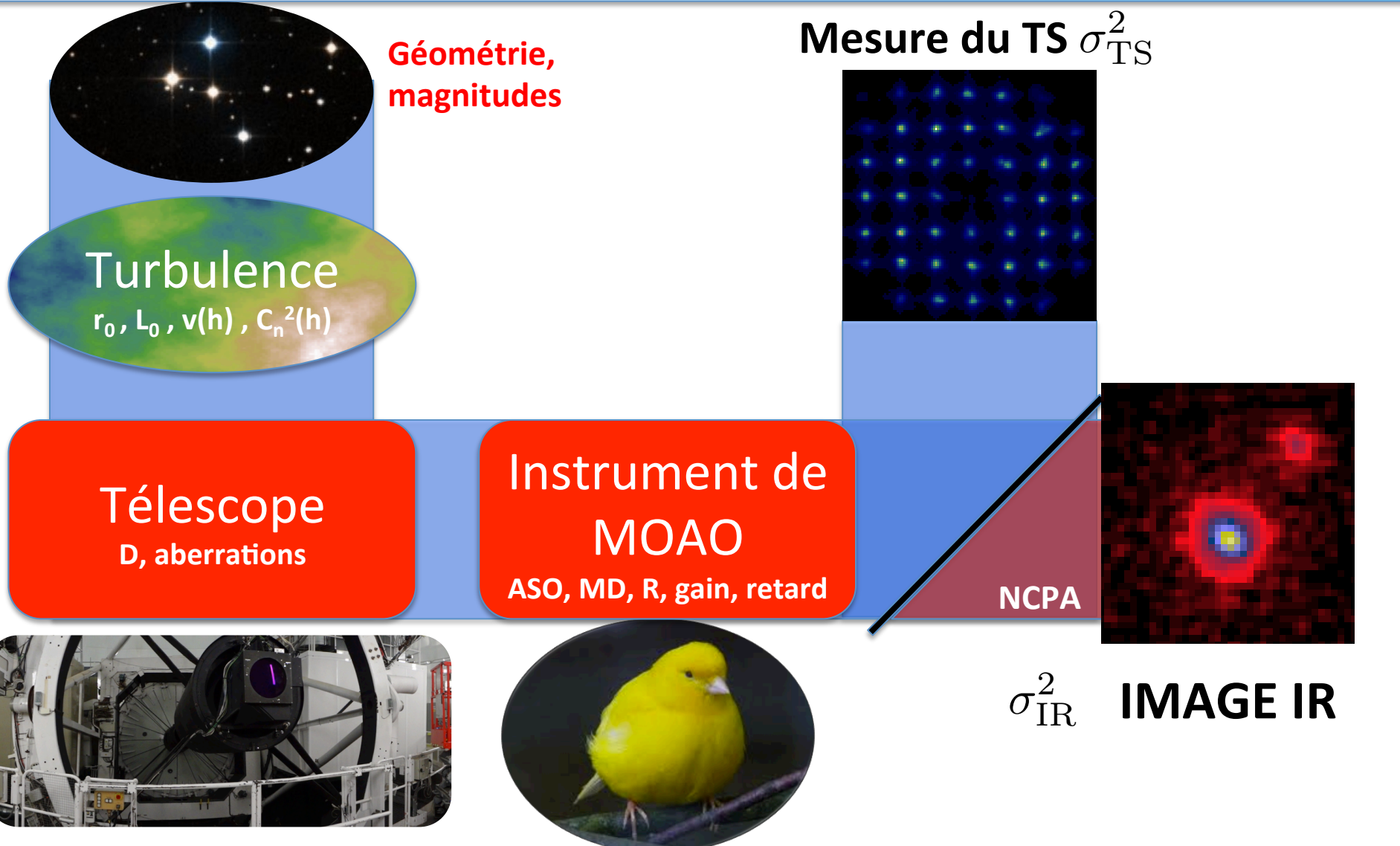
2. Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers

3. Modélisation d'un système de MOAO

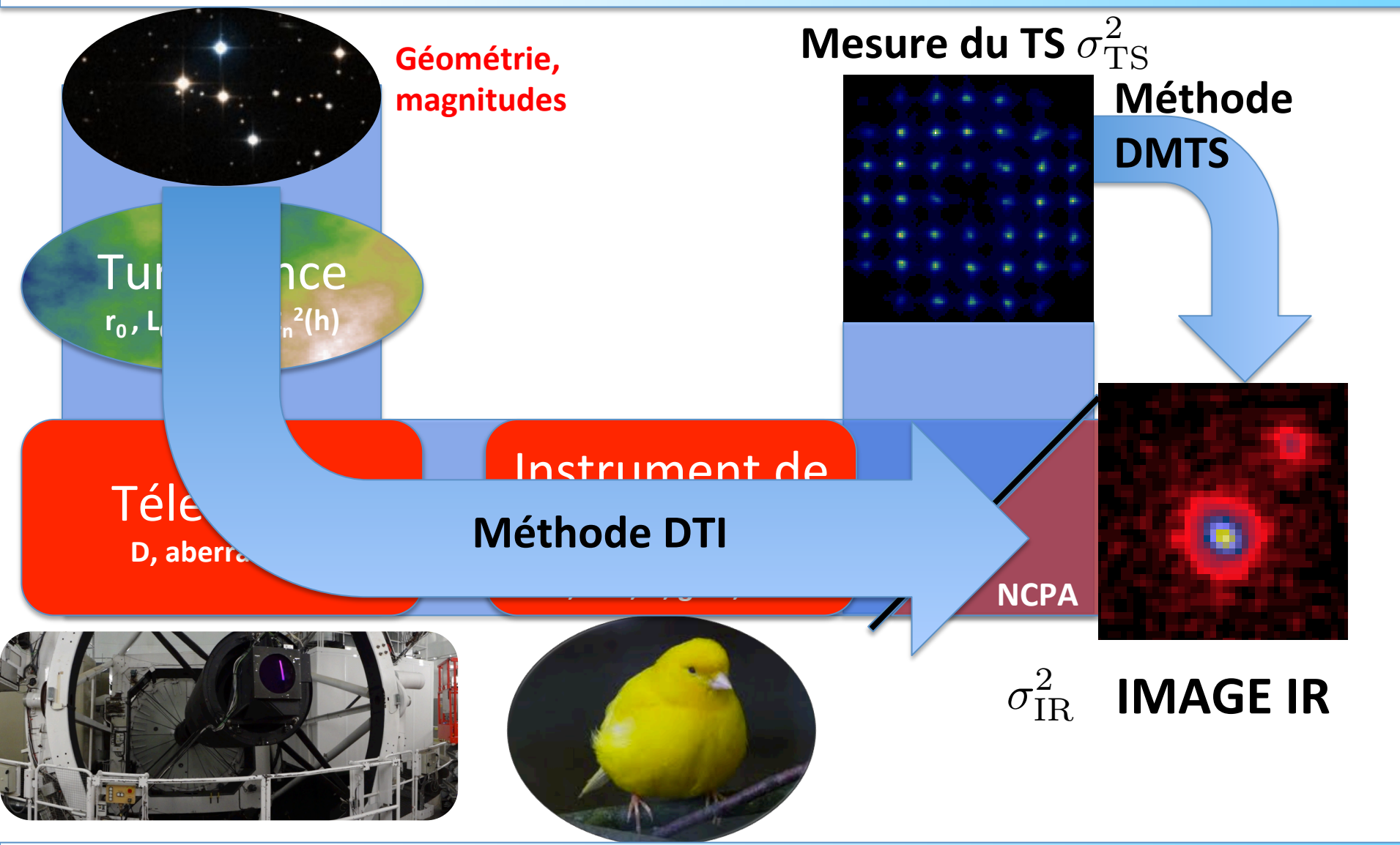
4. Résultats statistiques sur le ciel

5. Conclusions

Est-ce que les résultats de CANARY sur le ciel sont prédictibles ?



Est-ce que les résultats de CANARY sur le ciel sont prédictibles ?



Objectif : exprimer la variance du front d'onde au niveau de la caméra IR

Méthode DTI (Décomposition en Termes Indépendants) :

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{IR}}^2 = & \sigma_{\text{BW}}^2 + \sigma_{\text{Fitting}}^2 + \sigma_{\text{TomoIR}}^2 \\ & + \sigma_{\text{OL}}^2 + \sigma_{\text{NoiseIR}}^2 + \sigma_{\text{Static}}^2 + \sigma_{\text{NCPA}}^2\end{aligned}$$

Objectif : exprimer la variance du front d'onde au niveau de la caméra IR

Méthode DTI (Décomposition en Termes Indépendants) :

$$\sigma_{\text{IR}}^2 = \sigma_{\text{BW}}^2 + \sigma_{\text{Fitting}}^2 + \sigma_{\text{TomoIR}}^2 + \sigma_{\text{OL}}^2 + \sigma_{\text{NoiseIR}}^2 + \sigma_{\text{Static}}^2 + \sigma_{\text{NCPA}}^2$$

Erreur tomographique
= $f(R, C_n^2(h))$

Erreur d'étalonnage
des NCPA

Aberrations statiques

Erreur de bruit = $f(\text{gain}, \text{retard}, \text{bruit ASO})$

Erreur temporelle =
 $f(\text{gain}, \text{retard}, v)$

Erreur de boucle
ouverte = $f(M_{\text{int}}, r_0)$

Erreur de sous-
modélisation = $f(D, r_0)$

Objectif : exprimer la variance du front d'onde au niveau de la caméra IR

Méthode DTI (Décomposition en Termes Indépendants) :

$$\sigma_{IR}^2 = \sigma_{BW}^2 + \sigma_{Fitting}^2 + \sigma_{TomoIR}^2 + \sigma_{OL}^2 + \sigma_{NoiseIR}^2 + \sigma_{Static}^2 + \sigma_{NCPA}^2$$

Erreur tomographique = $f(R, C_n^2(h))$

Erreur d'étalonnage des NCPA

Aberrations statiques

Erreur de bruit = $f(\text{gain}, \text{retard}, \text{bruit ASO})$

Erreur de sous-modélisation = $f(D, r_0)$

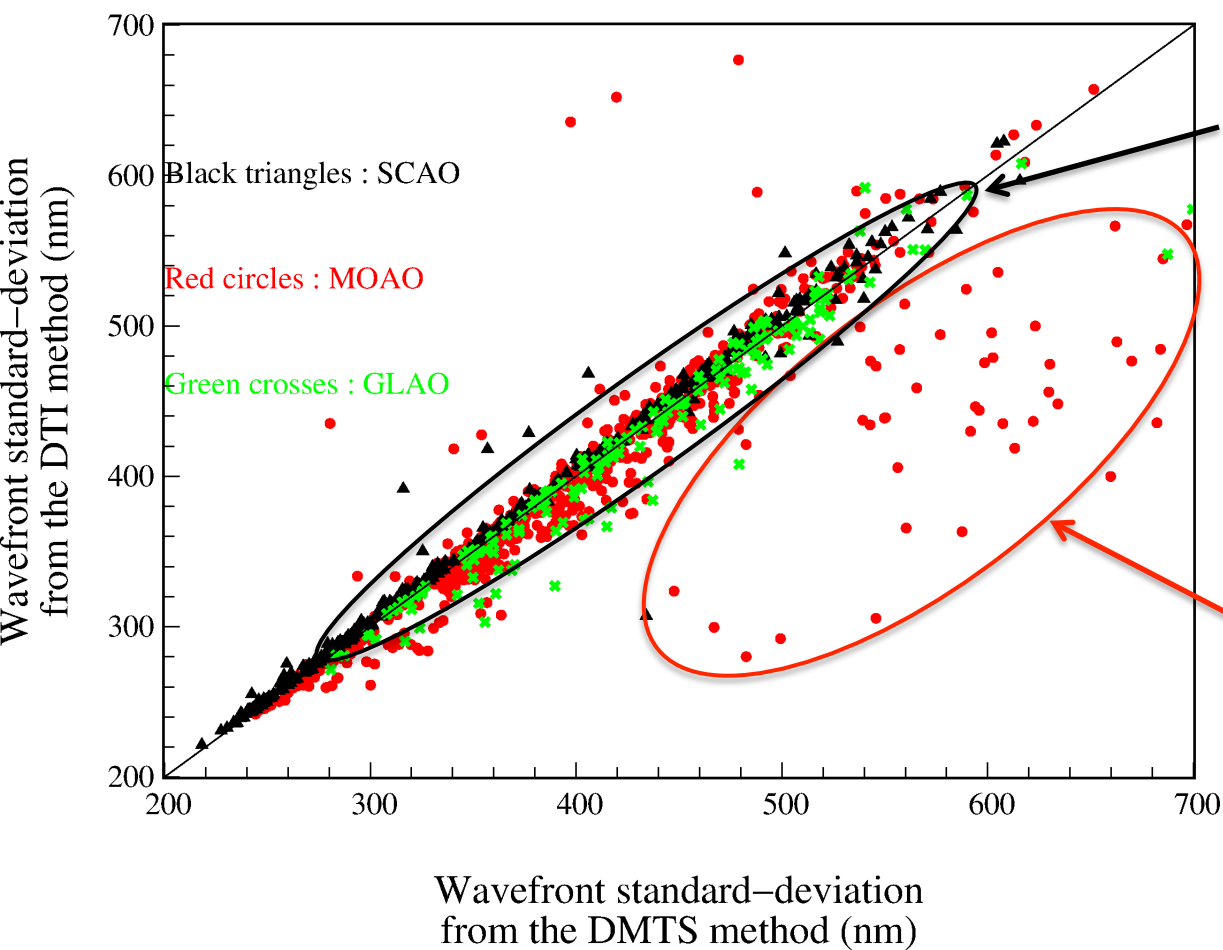
Erreur de boucle ouverte = $f(M_{int}, r_0)$

Erreur temporelle = $f(\text{gain}, \text{retard}, v)$

Méthode DMTS (Détermination à partir de la Mesure du TS) :

$$\sigma_{IR}^2 = \sigma_{TS}^2 + \sigma_{Fitting}^2 + \sigma_{NCPA}^2 - \sigma_{NoiseTS}^2 + \sigma_{AliasIR-TS}^2$$

Est-ce que les résultats de CANARY sur le ciel sont prédictibles ?



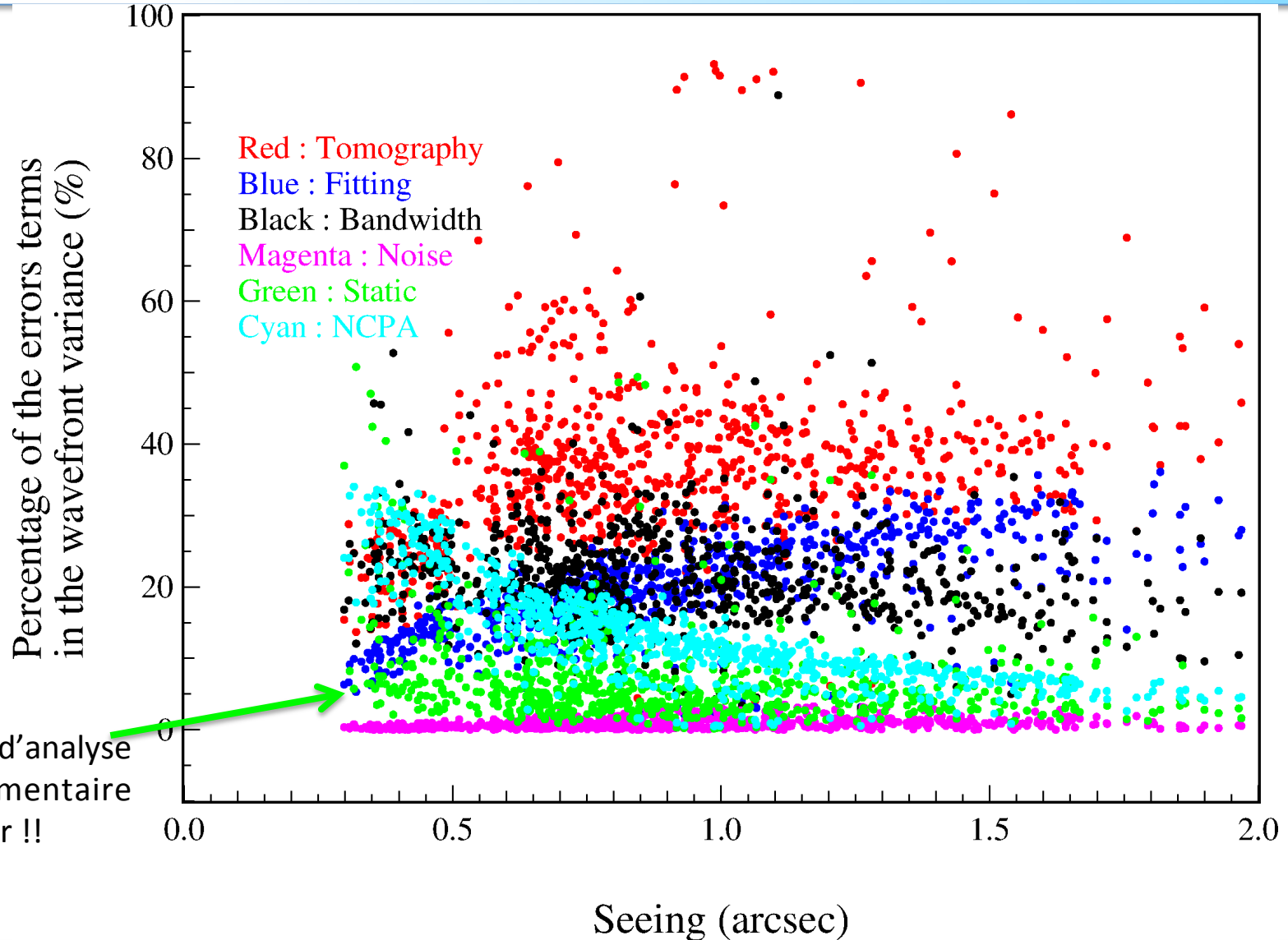
Biais très faible mais légère dispersion en MOAO sur **2 000 échantillons** :

- Bonne adéquation des deux méthodes à toutes les échelles d'erreur
- Méthodes d'estimations des postes d'erreur relativement exactes
- Approximations impactent peu
- Dispersion essentiellement engendrée par l'évaluation de l'erreur d'ajustement (hypothèse à vérifier)

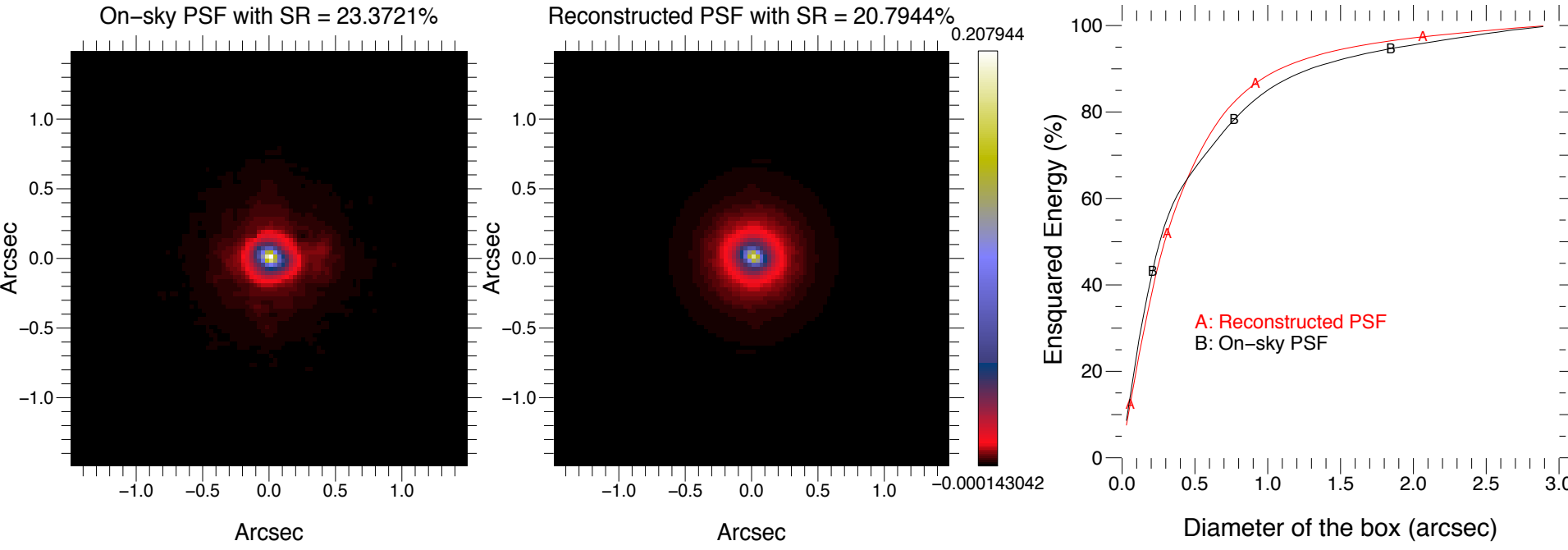
Cas isolés ($\approx 1\%$):

- Données corrompues
- Mauvaise identification des paramètres globaux
- Mauvaise identification du profil
- À identifier au cas par cas

Résultats sur le ciel: contribution relatives des postes d'erreur



Budget d'erreur \rightarrow variances \rightarrow covariances \rightarrow fonctions de structure de phase \rightarrow FTO \rightarrow FEP



- Méthode relativement fiable, permet de restituer raisonnablement la EE
- Entièrement issue du budget d'erreur => validation supplémentaire de la méthode DTI
- Basée sur des approximations fortes pour CANARY => point à améliorer
- Inclure des données étalonnées supplémentaires (fonctions d'influence réelles du MD)

- ✧ **Validation** statistique de la **modélisation** d'un système de MOAO à partir de **données ciel** acquises avec Canary

- ✧ **Erreur tomographique dominante ($\approx 40\%$)** dans le budget d'erreur, mais travail supplémentaire à mener sur **les aberrations statiques ($\approx 10\%$)** : origines, étalonnages

- ✧ Outils de **reconstruction de FEP prêt et fiable** pour simuler des cas **E-ELT**

SOMMAIRE

1. Introduction

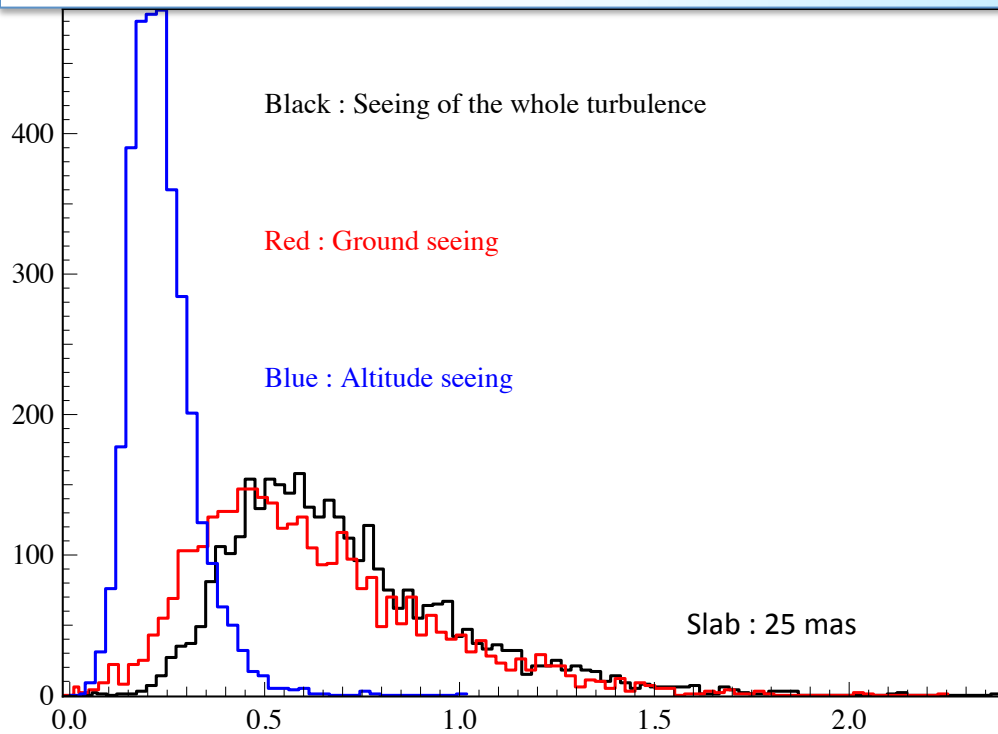
2. Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers

3. Modélisation d'un système de MOAO

4. Résultats statistiques sur le ciel

5. Conclusions

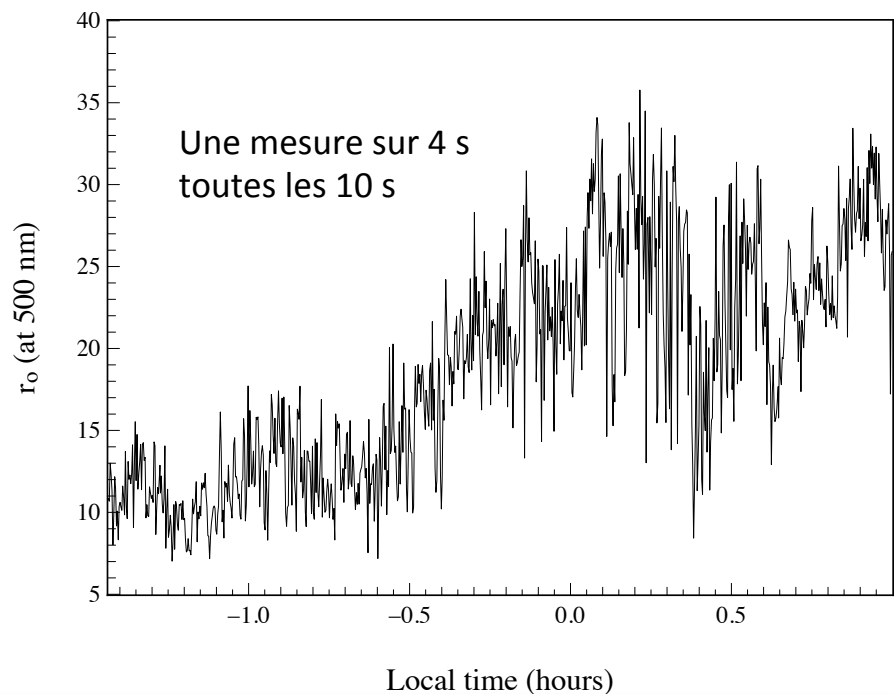
Variabilité des conditions d'observation

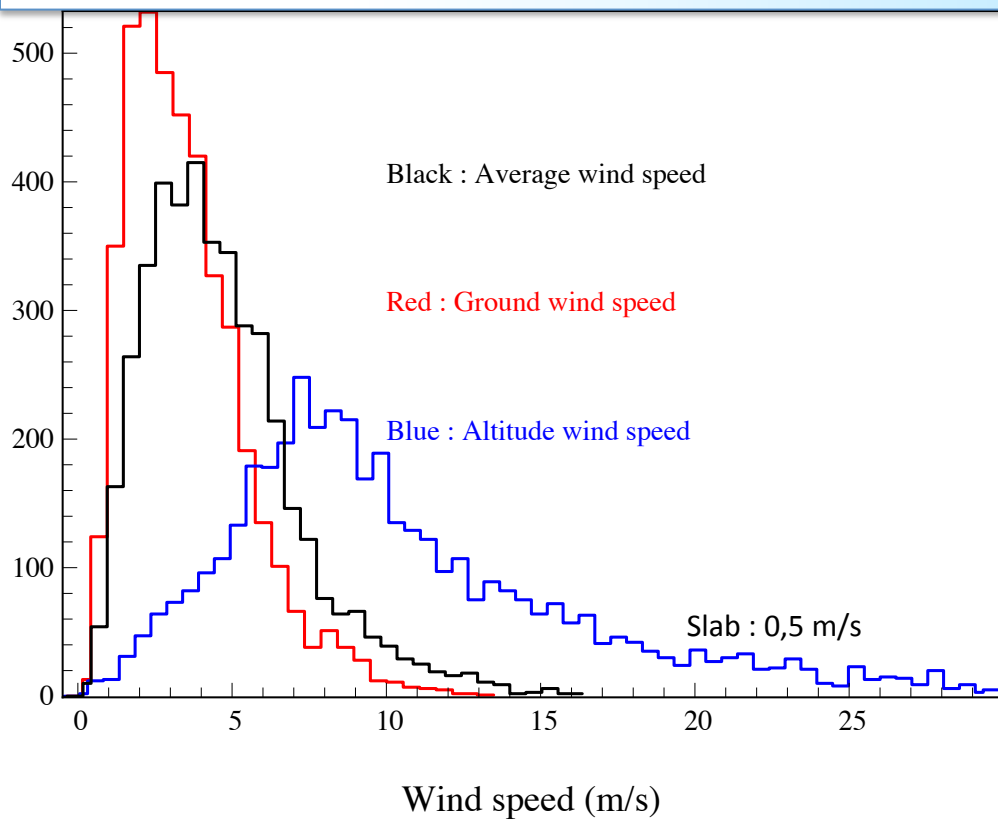


Seeing (arcsec)

	Médiane	rms
Seeing	0,650''	0,289''
Seeing sol (< 1km)	0,570''	0,300''
Seeing altitude	0,230''	0,083''

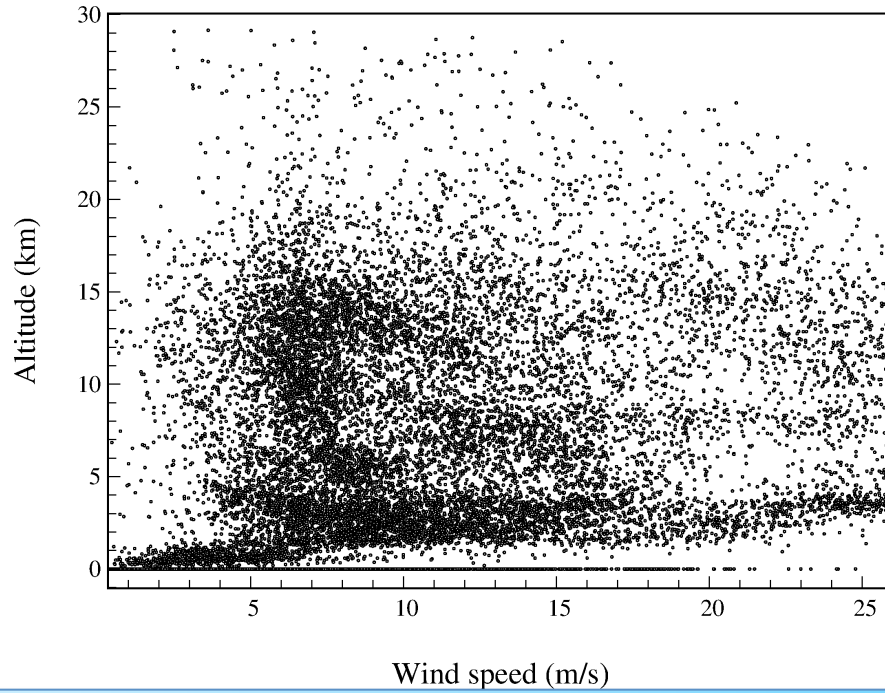
- Turbulence dominée par la couche au sol au WHT
- Seeing en altitude relativement constant $\approx 0,25''$
- Forte variabilité du seeing avec le temps, due aux fluctuations de la couche au sol

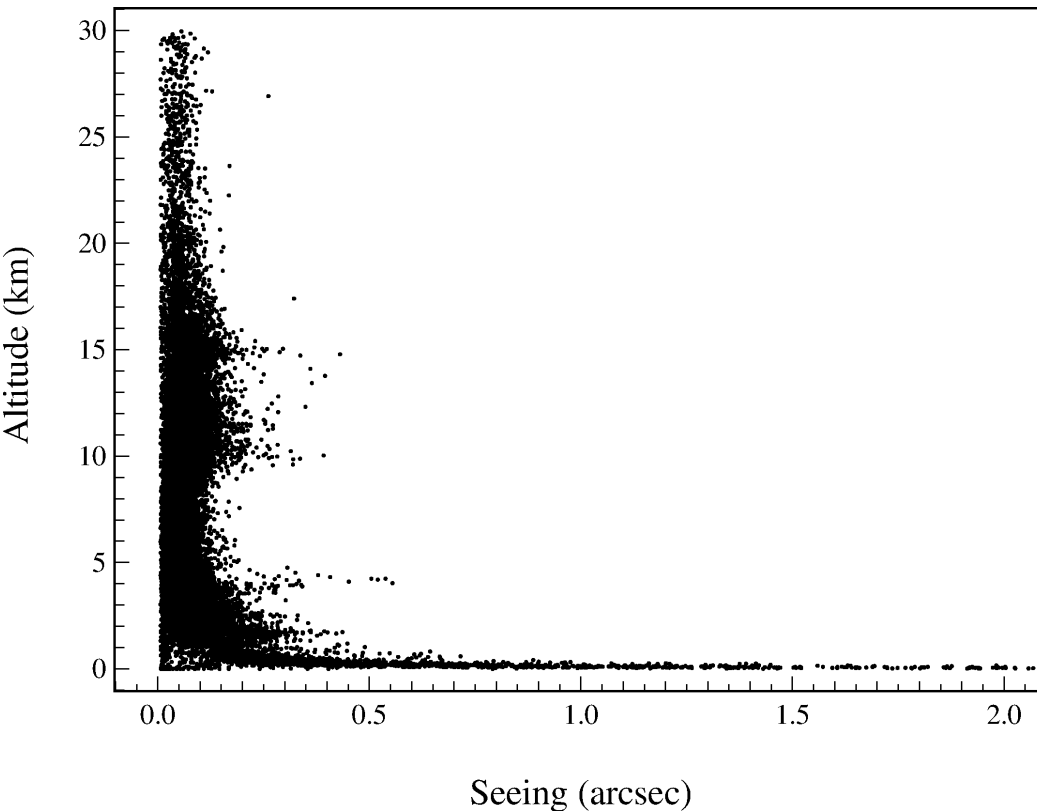




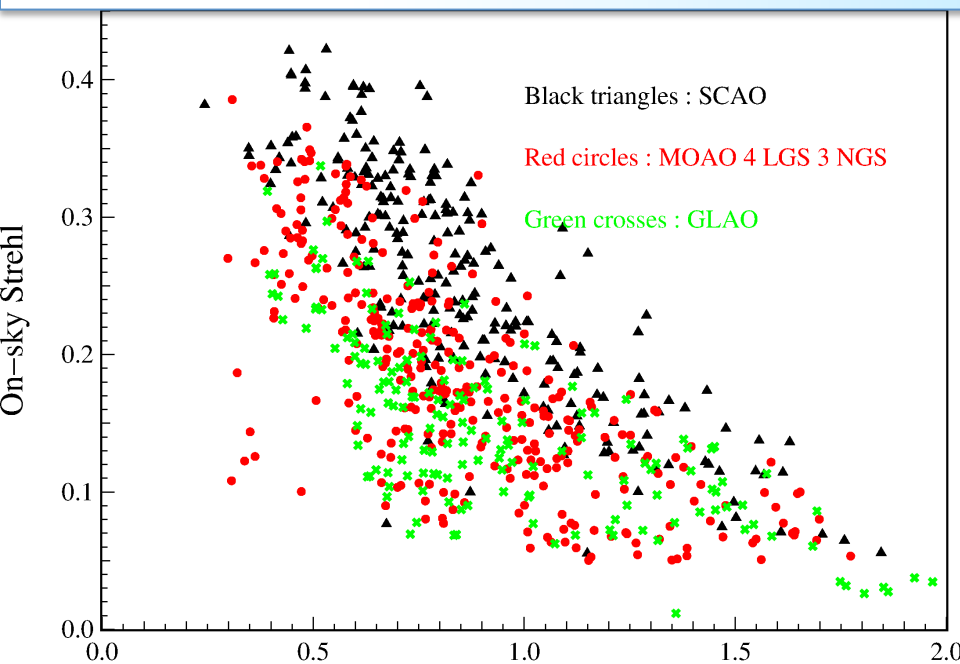
	Médiane	rms
vent	4,2 m/s	2,5 m/s
vent sol (< 1km)	3,2 m/s	1,9 m/s
vent altitude	9,0 m/s	5,7 m/s

- Comportement temporel de la turbulence dominé par la couche au sol
- Couches en altitude plus rapide que la couche au sol
- Grande variabilité de la vitesse des couches en altitude





- Énergie turbulente concentrée dans une voire deux couches
- Couche au sol relativement épaisse, concentration d'énergie autour de 10 km
- WHT + CANARY + L&A ($\Delta h \approx 1,5$ à 2 km)
=> **4 à 5 couches identifiables en moyenne**



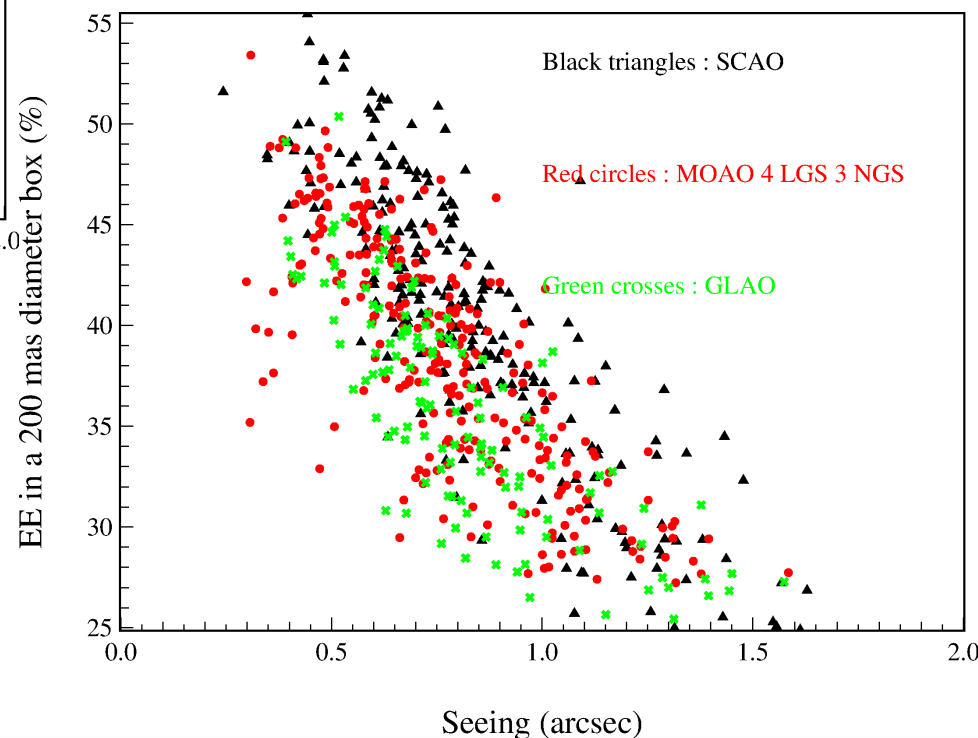
À 0,65'' : Seeing (arcsec)

SCAO : SR = 0,34 – EE 200 mas = 47 %

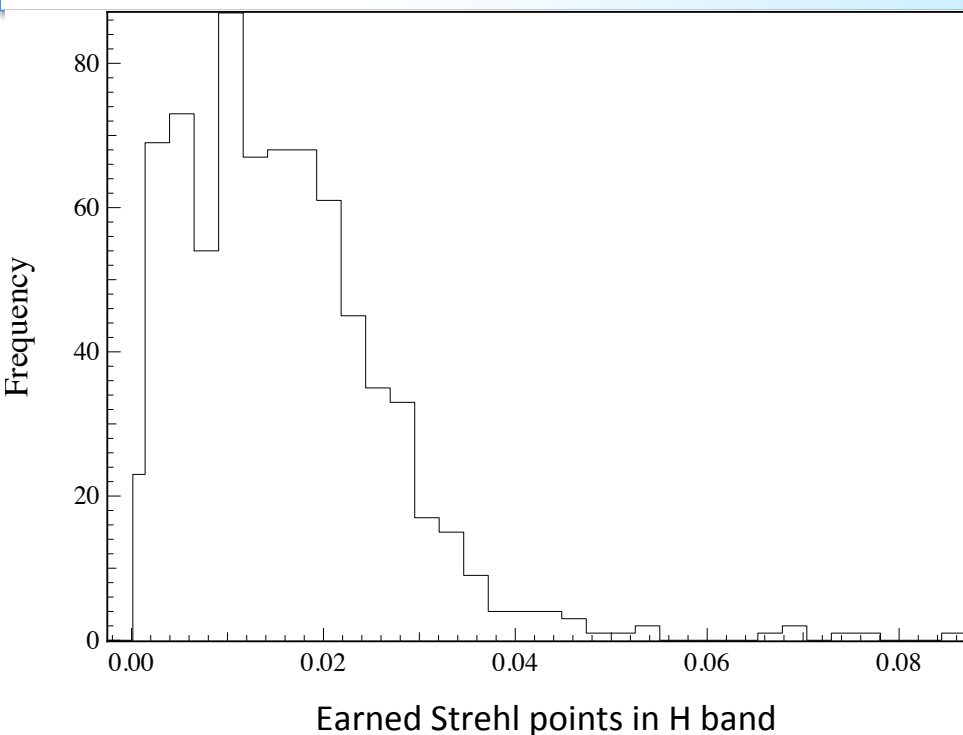
MOAO : SR = 0,26 – EE 200 mas = 43 %

GLAO : SR = 0,18 – EE 200 mas = 37 %

- Trois régimes distincts : SCAO, MOAO 4 LGS 3 NGS et GLAO. Plus notable sur SR que sur EE
- Grande dispersion des résultats -> fluctuations statistiques + variabilité du $C_n^2(h)$
- Écart SCAO/MOAO plus important à faible seeing



Résultats avec un reconstruteur tomographique optimisé



- Résultats MOAO 4 LGS 3 NGS sur A47
- **R** ciel = identifié en amont de l'engagement de la boucle
- **R** optimisé = identifié sur les mesures en boucle engagée
- Comparaison résultats **R** ciel/optimisé avec méthode DTI

- **MOAO** : performance limitée par les **couches à très haute altitude (>20 km)**, et non par l'identification du profil turbulent
- **GLAO** : performance limitée par les **couches entre 10 et 15 km** très énergétiques

- ✧ Au WHT, couche au **sol énergétique et très variable** mais **lente et stable en vitesse** + Couches en **altitude d'énergie stable** mais **de vitesse de vent rapide et très variable**

- ✧ **MOAO** statistiquement **plus efficace et robuste** que la **GLAO**, et limitée part les **couches à très haute altitude**

- ✧ **Dispersion** des résultats : **variabilité** des **conditions d'observations** importantes + **fluctuations statistiques** des observables

SOMMAIRE

1. Introduction

2. Tomographie en boucle ouverte avec étoiles lasers

3. Modélisation d'un système de MOAO

4. Résultats statistiques sur le ciel

5. Conclusions

➤ Tomographie en boucle ouverte

- ✧ Reconstruction MMSE nécessite un **modèle de la covariance spatiale**
- ✧ Identification des paramètres sur le ciel : **30 à 40 couches minimum sur E-ELT**
- ✧ **Compromis performance/robustesse** des reconSTRUCTEURS MMSE
- ✧ Méthode d'**évaluation** des **performances** tomographiques avec **matrice de covariance**

➤ Modélisation d'un système de MOAO avec LGS

- ✧ Démarche d'analyse avec le **budget d'erreur** en MOAO **validé** statistiquement pour CANARY
- ✧ Méthodologie transposable aux cas E-ELT
- ✧ **Outils de simulations fiables (reconstruction de FEP)** pour préparer l'E-ELT
- ✧ Mise en évidence de postes d'erreurs à analyser plus finement : **aberrations statiques !!**

➤ Résultats sur le ciel de CANARY

- ✧ **!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! Grande variabilité des conditions d'observations !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!**
- ✧ Performance limitée par les **couches à très haute altitude**
- ✧ **Validation** de la synthèse tomographique avec **LGS**
- ✧ **Fiabilité** de la **MOAO** statistiquement **démontrée** à partir de **données ciel**

➤ **Élargir la reconstruction tomographique**

- ✧ Caractérisation de la robustesse des reconstitueurs aux non-stationnarités du profil turbulent. Fréquence de mise à jour du reconstitueur ?
- ✧ Méthode d'évaluation des performances tomographiques à tester en LTAO et MCAO
- ✧ Reconstruction non linéaire à explorer (ex : Réseaux de neurones - Guzman 2012)

➤ **Aller plus loin dans la modélisation et la validation du système**

- ✧ **Optimisation de gain/modale** sur le ciel → méthode de détermination du gain optimal à tester
- ✧ **Commande LQG** → requiert une modélisation plus fine des entrées du système → Validation plus aboutie de la MOAO
- ✧ Utiliser des **Étoiles Na** pour se rapprocher d'un design MOSAIC et introduire des difficultés supplémentaires à modéliser

➤ **Préparer l'E-ELT**

- ✧ Développement hardware/software pour le calcul numérique des **reconstitueurs à très grands degrés de liberté** (par ex. sur GPU)
- ✧ Déterminer des **stratégies d'identification** des reconstitueurs. Utilisation d'un profiler externe ?
- ✧ **Simulations cas MOSAIC avec variabilité du profil turbulent**



PUIC PUIC !

**(MERCİ DE VOTRE
ATTENTION !!)**