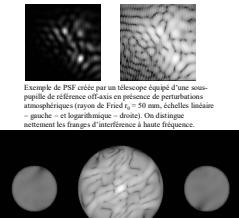
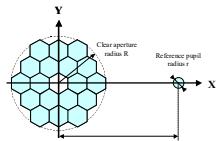


# Un senseur de surface d'onde en plan image et à décalage de phase

F. Hénault

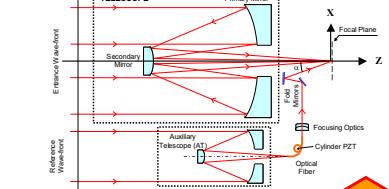
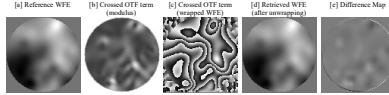
Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, Université Joseph Fourier, CNRS, B.P. 53, 38041 Grenoble – France

"Analysis of stellar interferometers as wavefront sensors," Appl. Opt. **44**, 4733-4744 (2005)



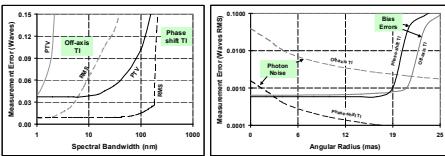
Exemple de PSF créé par un télescope équipé d'une sous-pupille de référence off-axis en présence de perturbations atmosphériques. On voit les franges d'interférence (à gauche - logarithmique - droite). On distingue nettement les franges d'interférence à haute fréquence.

## WFS interférométrique "off-axis"



Exemple de Fonction de Transfert de Modulation (FTM) produite par un WFS off-axis en présence de perturbations atmosphériques avec  $r_0 = 50$  mm. On voit que la phase de l'OTF est proportionnelle à la WFE du télescope.

"Signal-to-noise ratio of phase sensing telescope interferometers," J. Opt. Soc. Am. A **25**, 631-642 (2008)

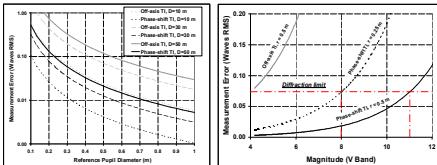


A gauche, la précision de mesure en fonction de la largeur spectrale (tracé noir); WFS à décalage de phase; tracé gris: WFS interférométrique off-axis; traits continu: PTV (tiers: valeur RMS). A droite, précision de mesure en fonction du rayon angulaire de l'étoile guide (tracé noir): erreur RMS tiers: contribution du bruit de photons). On suppose une longueur d'onde  $\lambda = 650$  nm et un temps d'intégration  $t = 10$  msec. Les courbes montrent en clair l'avantage du WFS à décalage de phase sur le WFS interférométrique off-axis.

Performance limitées par le bruit des photons du capteur CCD

$$|\delta\Delta(\vec{P})| \leq S_R / (k \times \text{SNR} \times S_r)$$

Relation théorique



A gauche, la précision de mesure en fonction du diamètre de la pupille de référence  $d = 2n$  pour différents diamètres de télescope  $D = 2R$  (tracé noir): WFS à décalage de phase; traits gris: WFS interférométrique off-axis; possibles:  $D = 10$  m;  $t = 30$  msec; SNR = 25.8. A droite, précision de mesure en fonction de la magnitude l'étoile guide pour  $D = 30$  m;  $t = 10$  msec;  $n = 2.5$ . L'avantage du WFS à décalage de phase est évident.

Criteria	OFF-AXIS TI	PHASE-SHIFTING TI
Allowed spectral bandwidth	< 0.4 %	Between 20 and 30 %
Limiting star magnitude for $D = 30$ m	4	11
Minimal number of pixels	1024 x 1024	256 x 256
Hardware complexity and costs	High, requires manufacturing of dedicated auxiliary telescope and associated delay line	Moderate, can be implemented with small and simple optical system located at the telescope focal plane

## Trade-off WFS off-axis/ à décalage de phase

"Conceptual design of a phase shifting telescope-interferometer," Optics Communications **261**, 34-42 (2006)

## WFS à décalage de phase

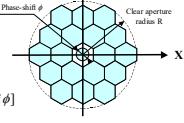
Introduction de 4 décalages de phase dans la pupille de référence:

$$\phi = 0, \pi/2, \pi \text{ et } -\pi/2$$

$$A(\vec{P}) = B_R(\vec{P}) \exp[i k \Delta(\vec{P})] + B_i(\vec{P}) \exp[i \phi]$$

$$OTF_\phi(\vec{P}) \approx OTF_R(\vec{P}) + C \times OTF_x(\vec{P}) + C \times B_R(-\vec{P}) \exp[-i k \Delta(-\vec{P}) + i \phi] \\ + C \times B_i(\vec{P}) \exp[i k \Delta(\vec{P}) - i \phi]$$

$$B_R(\vec{P}) \exp[i k \Delta(\vec{P})] \approx [OTF_R(\vec{P}) + i OTF_{x2}(\vec{P}) - OTF_x(\vec{P}) - i OTF_{x2}(\vec{P})]/4C$$



## Principe de la méthode

- Ajouter un signal de référence dans la pupille:

$$A(\vec{P}) = B_R(\vec{P}) \exp[i k \Delta(\vec{P})] + B_i(\vec{P} - \vec{P}_0) \quad k = 2\pi/\lambda$$

- Mesurer une ou plusieurs PSF

- Calculer les OTFs par TF inverse

- Combiner les OTFs linéairement

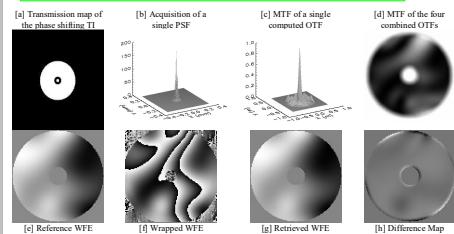
- Utiliser une "approximation Delta" pour retrouver les phases dans la pupille

$$OTF(\vec{P} - \vec{P}_0) \times B_{R+}(\vec{P}) = C \times B_R(\vec{P}) \exp[i k \Delta(\vec{P})] * B_i(\vec{P}) / S_r$$

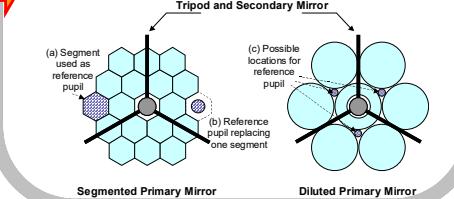
$$B_R(\vec{P}) \exp[i k \Delta(\vec{P})] \approx OTF(\vec{P} - \vec{P}_0) \times B_{R+}(\vec{P}) / C$$

$$\text{où } C = \frac{S_r}{S_R} \text{ facteur de contraste} \\ S_R \text{ aire pupille télescope} \\ S_r \text{ aire pupille de référence}$$

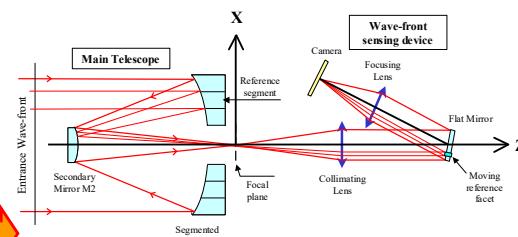
→ Mesure directe de la WFE (avec ambiguïté de  $2\pi$ )



Cas du WFS à décalage de phase dans un cas de transmission de l'atmosphère sous-précise de référence centrale: [a] Carte de transmission de l'atmosphère sous-précise de référence centrale; [b] Acquisition d'un PSF individuel; [c] MTF associée à ce PSF; [d] MTF pour quatre observations combinées; [e] WFE originale; PTV = 3.395 λ, et RMS = 0.943 λ, à z = 0.653 μm; [f] WFE mesurée après dépliage, PTV = 3.28 λ, et RMS = 0.937 λ; [g] Différence entre les WFE originale et mesurée, PTV = 0.251 λ, et RMS = 0.017 λ.



## Schéma optique



## Conclusion

- Le WFS à décalage de phase est beaucoup plus efficace que le WFS off-axis:

$$(\Delta\lambda/\lambda) \approx 20\%, \text{ Magnitude limite} = 11 \text{ en régime d'optique adaptative}$$

- L'ambiguïté de  $2\pi$  peut être levée en combinant trois canaux spectraux différents

(F. Hénault, Pure and Applied Optics 2009)

- Suites possibles:

- Déconvolution pour éliminer "l'approximation Delta"
- Implémentation sur un banc de test

francois.henault@obs.ujf-grenoble.fr