

ASO focaux et télescopes multipupilles : un gain en compacité et/ou en complexité

F. Cassaing¹, L. M. Mugnier¹,
I. Mocoer^{1,2}, B. Fleury¹

1 -ONERA/DOTA/HRA, 29 av de la Division Leclerc, BP72, F-92322 Châtillon Cedex
2 -Centre National d'Etudes Spatiales, 18 av Edouard Belin, F-31401 Toulouse Cedex 4

Contact : Frederic.Cassaing@onera.fr, tél : 01 46 73 48 54

Résumé

Trois récents brevets ONERA aident à s'affranchir des limitations des systèmes optiques habituels (fig. 1a), les rapprochant de configurations éprouvées dans le domaine radio-fréquence (figure 1b).

- 1. Analyse de surface d'onde... sans analyseur !** : pour un objet ponctuel, la seule image au voisinage du plan focal d'un système permet de mesurer toutes ses aberrations, sans utiliser d'analyseur de surface d'onde (ASO) « dédié ».
- 2. Imagerie haute résolution d'objets étendus** : les instruments d'observation peuvent être limités par la turbulence atmosphérique ou des aberrations. Un système de correction numérique, à bas coût, est alors un avantage déterminant.
- 3. Télescope compact** : le volume et la masse alloués peuvent limiter le diamètre D d'un instrument et donc ses performances. Un télescope de longueur $L_2 \ll D$ peut remplacer avantageusement un télescope classique pour lequel $L_1 > D$.

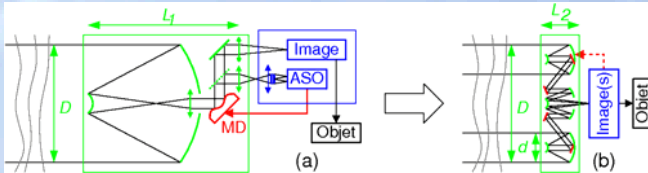


Fig. 1 : Système conventionnel (a) et incluant les 3 innovations présentées ici (b).

1. Analyseur de surface d'onde en plan focal

Le problème :

- Les aberrations d'un système optique peuvent s'estimer à partir de la seule image focale d'un point source
- Cette image ne permet pas de déterminer le signe de certaines aberrations.
- La solution développée par l'Onera [1] :**
- L'ambiguïté est levée en ajoutant une aberration connue, par exemple une défocalisation, d'amplitude supérieure aux aberrations à mesurer (Fig. 3).
- Optiquement très simple, cet ASO transfère la complexité sur le traitement des données.
- Nom : SICLOPE (Single Image with Calibrated Offset for Phase Estimation).

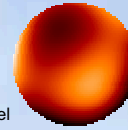
Applications :

- Analyse de front d'onde dans des cas difficiles (IR, X, pupilles segmentées),
- Extension du Shack-Hartmann (ordres supérieurs dans chaque sous-pupille),
- Mesure complémentaire simple (mesure des bas ordres pour une étoile laser),
- Etalonnage des aberrations d'une voie image (→ pré-compensation par OA),
- MCAO (ASO sur chaque étoile présente dans une image à grand champ).

Aberration	Défocalisation		Astig. 45 deg		Astig. 0 deg		Coma		Ab.sphérique	
	+1rad	-1rad	+1rad	-1rad	+1rad	-1rad	+1rad	-1rad	+1rad	-1rad
Plan focal										
Plan extra-focal (défocalisé de 2 rad)										

Conditions de simulation :

- Aberration (Strehl ratio = 0.66)
- Défocalisation de 1.5 radians
- Bruit de lecture : 10 photo-électrons/pixel
- Nombre de photo-électrons = 1e6



Résultats :

- Image focale (pour mémoire)
- Image extra-focale (la seule utilisée par l'algorithme)



Aberrations	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Introduites	-0.186	0.102	0.192	0.420	-0.300	0.078	-0.240
Estimées	-0.184599	0.101613	0.191141	0.419136	-0.29910	0.0774966	-0.239928

Fig. 3 : Validation par simulation de l'analyse de surface d'onde en plan focal.

2. Imagerie haute résolution d'objets étendus en présence de perturbations

Le problème :

- Un objet étendu est observé en présence de perturbations.
- Aucune source ponctuelle est disponible pour l'analyse de front d'onde.
- Un système de correction simple est souhaité.

La solution développée par l'Onera [2] :

- L'objet et la phase peuvent être estimés par **diversité de phase**, à partir d'au moins deux images différentes (par exemple, une image focalisée et une image défocalisée, cf figure 4).
- Un nouvel algorithme [3] permet le calcul temps-réel pour des faibles aberrations (contrairement aux algorithmes conventionnels itératifs) et permet :
 - D'effectuer la mesure de phase sans autre système que la voie image (peu modifiée),
 - De minimiser ainsi les biais entre l'ASO et la voie image,
 - De corriger optiquement le système avec un MD grâce à la phase estimée, et/ou
 - De déconvoluer numériquement l'objet observé grâce à la phase estimée.

Applications :

- Correction numérique de scènes terrestres sur des systèmes d'imagerie (aucune source de référence, volume/coût limités, aberration assez faible),
- Cophasage de miroirs segmentés (étoile observée dégradée par la turbulence).

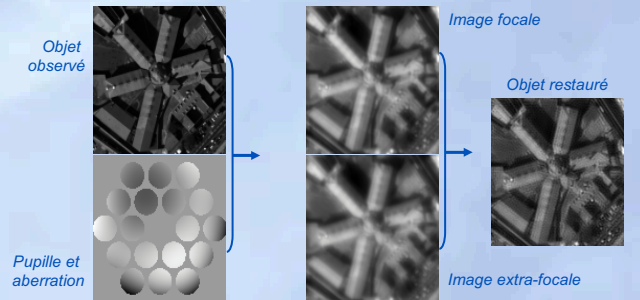


Fig. 4 : Images d'une scène étendue en présence d'aberrations et objet restauré.

3. Télescope compact

Le problème :

- Des contraintes (masse, volume) peuvent limiter le diamètre D d'un système.
- En général, la longueur L_1 d'un télescope est telle que $L_1 \geq 1,5D$ (fig. 1a).

La solution développée par l'Onera [4] :

- Des sous-télescopes de diamètre d ont une longueur $L_2 \ll L_1$ (figs. 1b, 5).
- Correctement agencés, cophasés et recombinaison, ces sous-télescopes présentent des performances similaires à celles d'un télescope monolithique [5,6].
- Les sous-télescopes peuvent être cophasés par les techniques précédentes.
- Avec une recombinaison incohérente : résolution = l/d , surface $\gg pd^2/4$.

Applications :

- Systèmes (lidars, imageurs) embarqués sur porteur (terrestre/aérien/spatial),
- Systèmes compacts (télécommunications),
- Systèmes agiles (pointage rapide de cibles),
- Réseaux d'émission/réception laser.

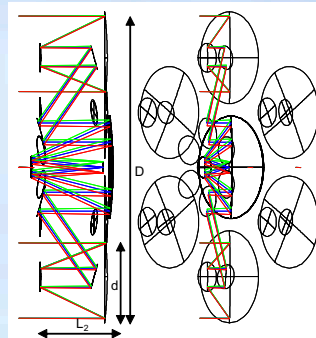


Fig. 5 : Validation du télescope compact par simulation sous Zemax

- Système constitué de :
 - Six télescopes afocaux,
 - Six trains périscopiques,
 - Un télescope de recombinaison.
- Longueur totale typique :
 - $d = D/3.5$ (pour 6 sous-pupilles)
 - $L_2 \approx 1,5d \approx 0,4D \ll L_1 \approx 1,5D$
- Validé par simulation sous Zemax.
- Performances typiques :
 - Champ $> 1000 \times 1000$ pixels.
 - WFE $< 1/30$.
- Les corrections en piston/tip/tilt des périscopes remplacent un miroir déformable et ses optiques de reprise.

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB