



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



DICOS: démonstrateur de techniques avancées de pointage et de contrôle du front d'onde pour de futures missions spatiales

J.M. Le Duigou, C.A. Chevrier, M. Clavery, F. Gant, B. Gorin, F. Henault, C. Latry, F. Mirc, J. Montel, A. Peus, A. Rafflegeau, B. Regnier (CNES)

INTRODUCTION

DICOS vise à faire voler un télescope actif de 40 cm sous un ballon stratosphérique pour démontrer des techniques avancées de pointage fin et de stabilisation du front d'onde. Un modèle sol à échelle 1 est en cours de développement dans le cadre d'un PEX. Les objectifs techniques sont issus de la coronagraphie pour la détection directe des exo-planètes :

Pointage : 10 mas, 3 étages, BP 50 Hz
WFE : 20 nm rms, stabilité 1 nm, BP 0.01 Hz

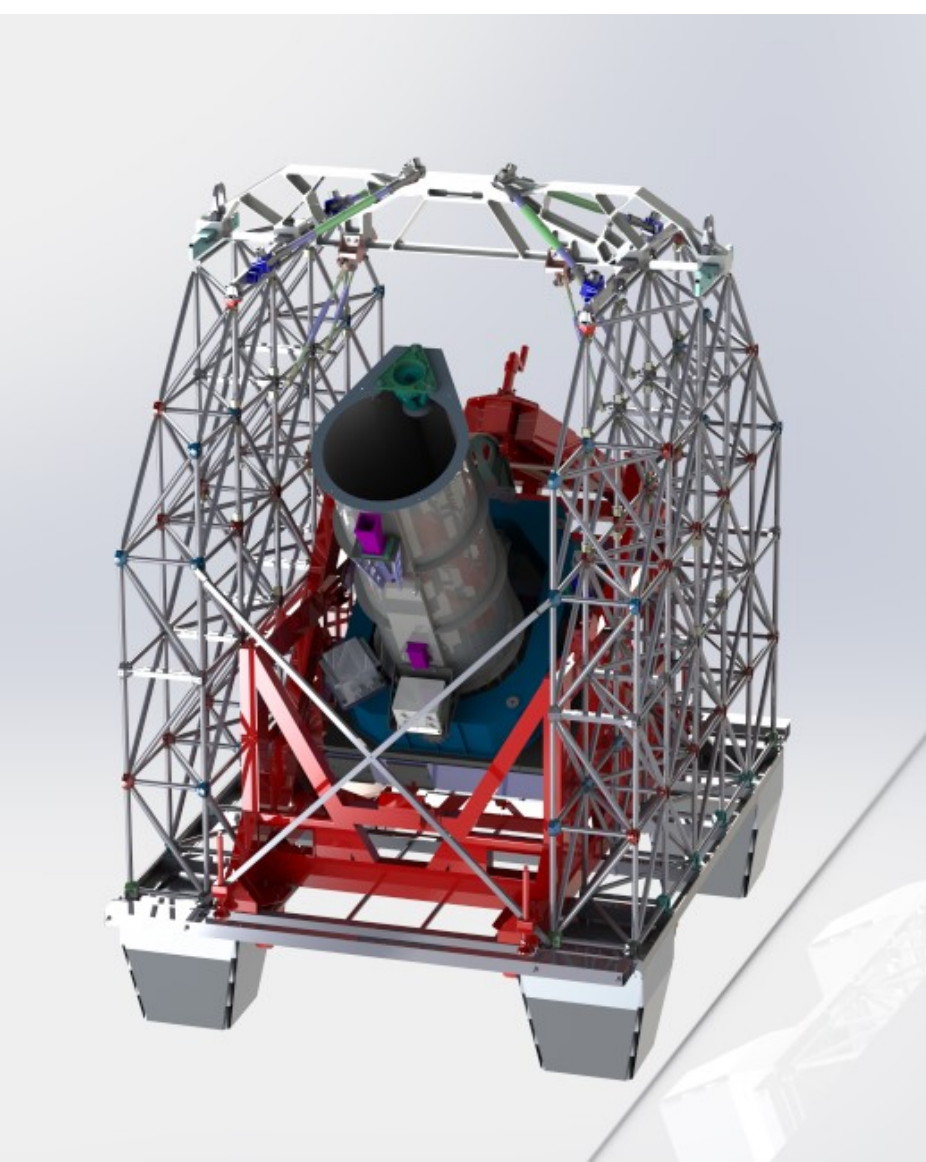


Fig. 1 – Nacelle CARMEN, telescope&bâti



Démonstrateur
technologique

CARACTERISTIQUES

Instrument

150 kg, 150 W,
25 m².kg, AI

M1 : concave, 40 cm, RSA 905, WFE 100 nm rms

M2 : convexe, mécanisme 6 ddl PI H811, alignement initial

Structure : tube aluminum, supporte les miroirs, la centrale inertielle, le senseur stellaire, le banc optique

Banc optique : 0,9 x 0,9 m, alu, montures du commerce,

relai de pupille avec paraboles off axis dédiées en verre

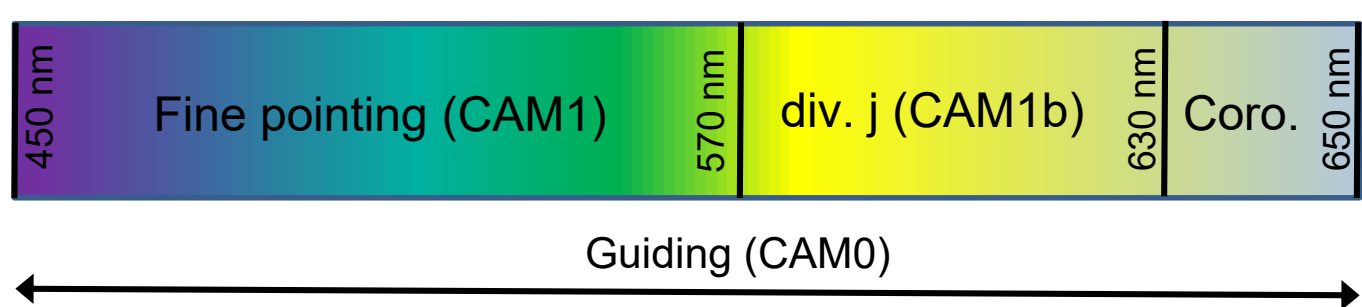
Opt. active : ALPAO DM97-25+algo. diversité de phase^{6,7}

Commandes de correction de WFE envoyées depuis le sol

Cameras : AVT GT 1930 (pointage fin) GT 4907 (guide)

Coronographe : 4 quadrants pour vérifier la WFE atteinte⁸

L'instrument utilise 3 bandes spectrales et 4 cameras :



Nacelle & Avionique

Adaptation
matériel/logiciels
existants

Nacelle : CARMEN avec une poutre renforcée

Matériel existant : mécanisme de pivot, moteurs élévation/cross-élévation, senseur stellaire, centrale Inertielle

Cadres d'élévation et de cross-élévation spécifiques

Utilisation de driver/software existants (environnement QNX)

Adaptation du développement Estadius¹²

Driver MD spécifique qui superpose la commande de pointage très fin (500 Hz) et celle de contrôle de la WFE

Une camera guide (CAM0) rattrape le biais du senseur stellaire pour injecter la lumière dans le banc optique

ETUDES

Pointage

Fireball^{13,14} a démontré une performance de pointage de 0,5" rms avec une architecture à deux étages. DICOS ajoute un étage pointage très fin dans l'instrument pour atteindre un facteur de réjection de 50 à 100 et ainsi le niveau de 10 mas. Le tableau suivant donne les exigences prévues pour chaque étape :

Etage	Stab. 3 σ	Mesure	Bande Pas.
Pointage azimuth	0.01"	25 Hz IMU0	0.3 Hz
Pointing fin 1	2 to 10"	Filtre Kalman gyrostellaire 200 Hz IMU1 – 4 Hz DTU	10 Hz
Pointage fin 2	0.8"	500 Hz CAM1	10 Hz
Pointage très fin	0.01"	500 Hz CAM1	50 Hz

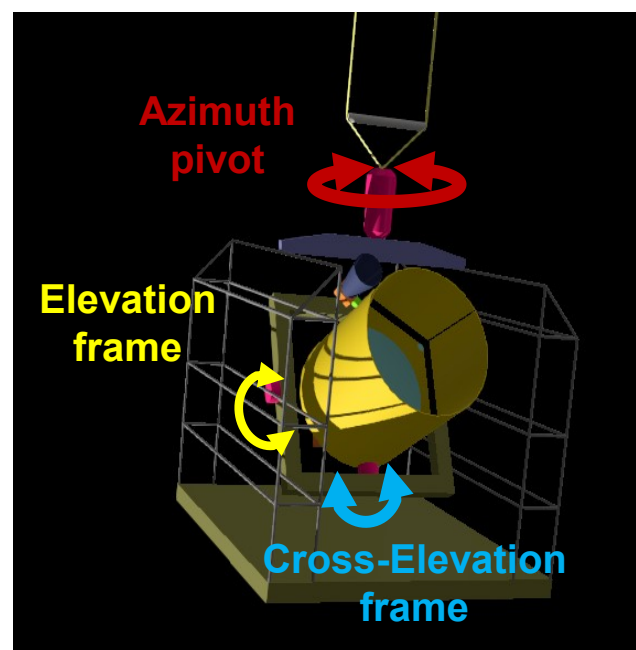


Fig. 3 – architecture pointage

Mécanique

L'analyse MEF démontre que le 1^{er} mode impactant la ligne de visée est > 25 Hz ce qui évite l'instabilité de l'étage de pointage #2. Combiné avec des mesures de perturbation des roues de réaction, Il prédit un niveau de microvibrations < 0,1 px (10 mas).

Optique

Un modèle séquentiel Zemax multi-configuration permet d'optimiser les paramètres optiques, d'effectuer une analyse de sensibilité de la WFE et de générer la géométrie pour le travail de CAO. Un miroir incliné avec un trou central sépare spatialement les faisceaux CAM0 et CAM1. Des dichroïques sont utilisés pour les autres canaux.

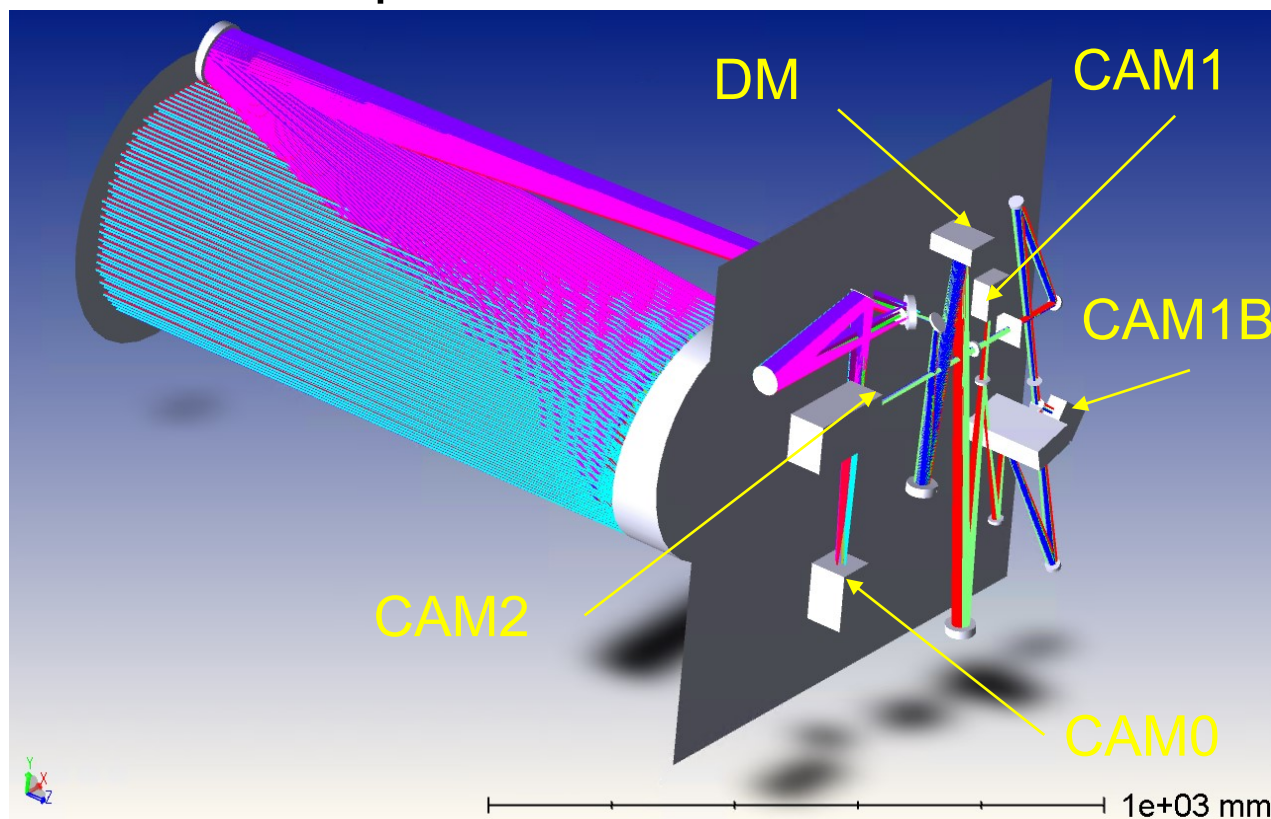


Fig. 4 – Modèle Zemax

Off axis
Ritchey-
Chretien
D=40 cm
18' FOV
~2x1x1 m

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nacelle de test en salle et sur ciel

La nacelle de test n'est pas représentative mécaniquement ni optiquement de DICOS mais permet des essais fonctionnels.

Fermeture de la boucle de pointage en azimuth et de pointage fin sur information IMU et caméra avec simulateur d'étoile en salle (collimateur réalisé en interne CNES), puis sur information IMU hybridé avec senseur stellaire et caméras sur ciel réel.

Validation fonctionnelle des différents modes de pointage et de la séquence d'acquisition d'étoile, avec essais sur ciel nacelle suspendue. Les ordres de grandeurs de performance de pointage sont atteints mais un retard identifié de quelques ms limite la performance atteignable (des progress sont en cours).

Fig. 6 – Résultats de pointage

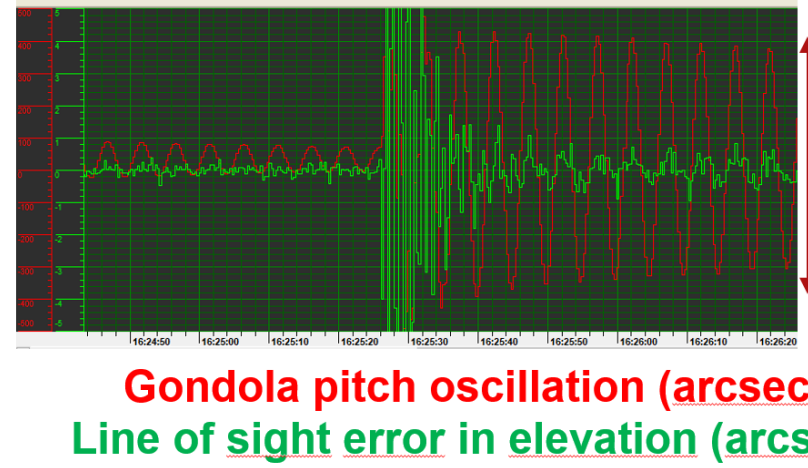
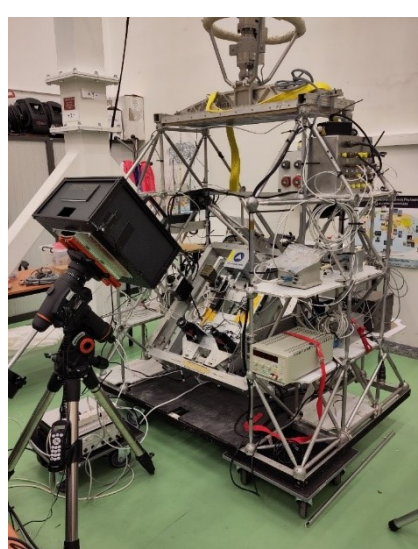


Fig. 5 – Nacelle de test et collimateur

Fig. 7 – Essai sur ciel de nuit

Pointage très fin et correction image par MD

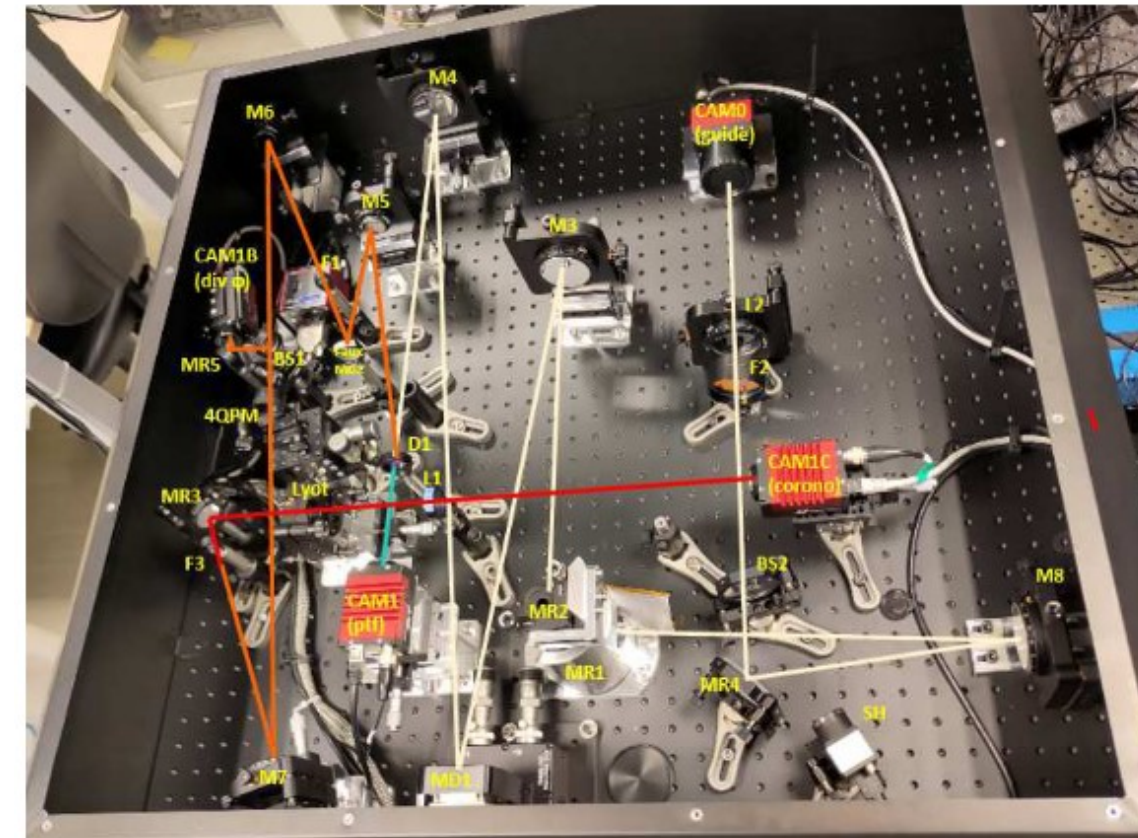


Fig. 8 – banc optique intégré

Les tests menés sur le banc optique intégré ont montré que la boucle d'optique active peut converger à qq nm rms en 2-3 itérations à partir d'une WFE initiale de 500 nm rms. La stabilité sur qq heures est < 1 nm rms, hors μ vib (BP 0,02 Hz).

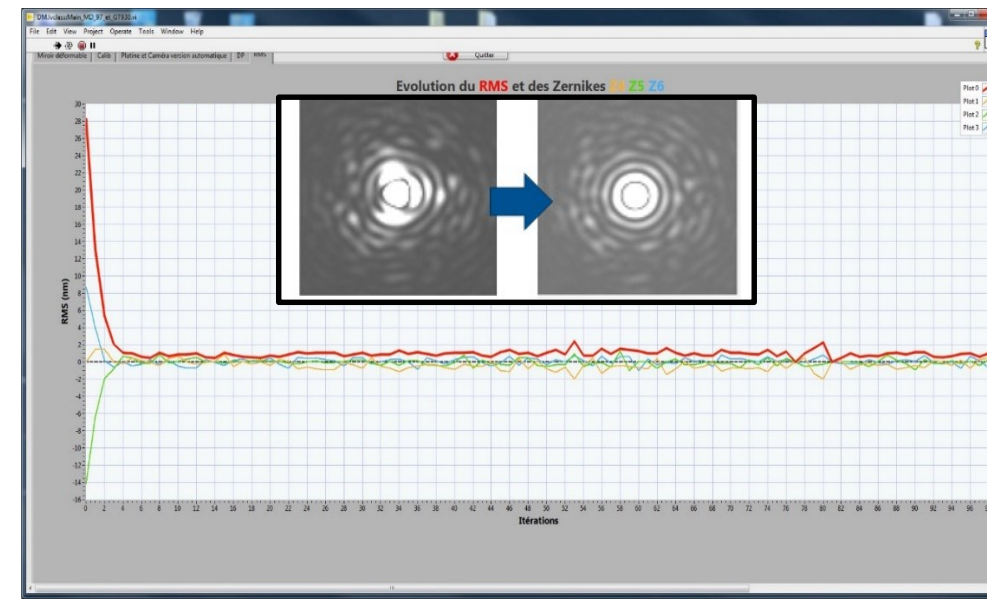


Fig. 9 – performance OA en Boucle fermée

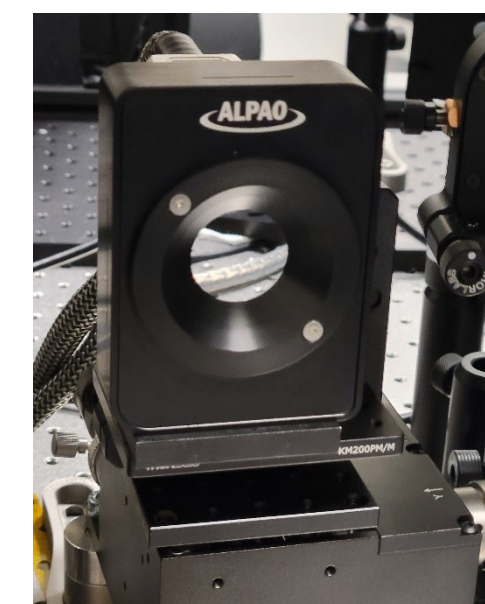


Fig. 10 - DM 97-25 (ALPAO)

Nous avons également montré la performance du pointage très fin et sa superposition avec le contrôle de WFE. La réjection du résidu de l'étage supérieur (1 as, 0,5 Hz) est de l'ordre de 100.

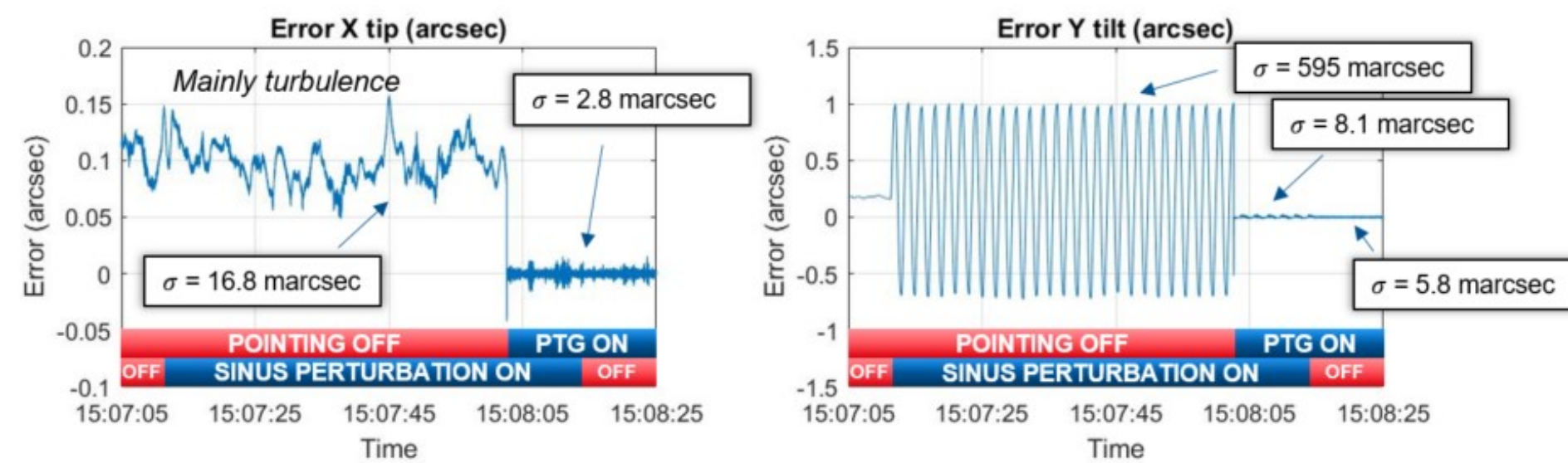


Fig. 11 – Performance du pointage très fin

CONCLUSIONS

Les études et les travaux expérimentaux constituent une base solide pour la première partie du projet DICOS. Les principaux sous-systèmes ont réalisé la phase de fabrication et l'assemblage de l'instrument est en cours, dans l'attente de la livraison d'un miroir. Nous prévoyons une démonstration complète au sol début 2025. Un véritable premier vol nécessitera un travail complémentaire au niveau de l'électronique, de la nacelle, du contrôle thermique, ainsi qu'une adaptation aux conditions environnementales, mais nous ne voyons aucun obstacle majeur.

REFERENCES

1. C.B. Mendillo et al. "The Low-Order Wavefront Sensor for the PICTURE-C Mission," SPIE Proceedings Volume 9605, (2015)
2. C.B. Mendillo et al. "Optical tolerances for the PICTURE-C mission: error budget for electric field conjugation, beam walk, surface scatter, and polarization aberration," Proc. SPIE 10400 (2017)
3. C. Marois et al. "MAPLE: Reflected Light from Exoplanets with a 50-cm Diameter Stratospheric Balloon Telescope", Proc. SPIE 9143, (2014)
4. O. Côté et al. "A precursor mission to high contrast imaging balloon system", Proc. of SPIE Vol. 10702 (2018)
5. C.A. Chevrier "Attitude control system architecture of the DICOS mission: ambitious sub arcsec pointing using adaptive optics", 25th ESA PAC Symposium – Biarritz, France (2022)
6. Ch. Latry, J. M. Delvit, C. Thiebaud, "Sensitivity analysis of phase diversity technique for high resolution earth observing telescopes", Proceedings Volume 10562, International Conference on Space Optics — ICSO 2016;
7. L. Mugnier "Phase Diversity: A Technique for Wave-Front Sensing and for Diffraction-Limited Imaging", Advances in Imaging and Electron Physics 141:1-76 (2006)
8. D. Rouan, P. Riaud, A. Boccaletti, Y. Clénet, A. Labeyrie, "The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph. I. Principle", Publication of the ASP, 112:1479-1486 (2000)
9. R. Galicher, P. Baudoz, G. Rousset, J. Totems and M. Mas "Self-coherent camera as a focal plane wavefront sensor: simulations," Astronomy and Astrophysics 509, A260000+ (2010).
10. P. Baudoz, R. Galicher, A. Potier, O. Dupuis, S. Thijs, F. Patru, "Optimization and performance of multi-deformable mirror correction on the THD2 bench", Proc. Of SPIE Vol. 10706 (2018)
11. P. Baudoz, R. Galicher, F. Patru, O. Dupuis, S. Thijs "Status and performance of the THD2 bench in multi-deformable mirror configuration", AO4ELT 2017 conference proceeding
12. J. Montel et al., "ESTADIUS: A High Motion "One Arcsec" Daytime Attitude Estimation System for Stratospheric Applications", Proc. of the 22nd ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Tromsø, Norway (2015)
13. M. Matuszewski et al. "FIREBALL: Instrument pointing and aspect reconstruction", Proc. of SPIE Vol. 7732 (2010)
14. J. Montel et al., FIREBALL-2 (2018) in flight performances, ESA PAC 2019