

LA TOMOGRAPHIE DE L'ATMOSPHÈRE au service de l'astrophysique

Benoit NEICHEL¹

Gérard ROUSSET²

¹ Aix Marseille Univ., CNRS, CNES, LAM, Marseille, France

² LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Meudon, France

benoit.neichel@lam.fr

gerard.rousset@obspm.fr

Afin d'observer les objets les plus distants de l'univers, ou d'observer et caractériser des exoplanètes, les astronomes ont besoin de télescopes toujours plus grands. Augmenter la taille des miroirs des télescopes a deux objectifs :

- augmenter le flux total collecté, réduisant par là même le bruit de photons qui représente la limite fondamentale de toute observation ;
- améliorer potentiellement la résolution angulaire sur les objets observés.

Ainsi, les plus grands télescopes au sol aujourd'hui ont des diamètres de 8 à 10 m, et la future génération de télescopes extrêmement grands (Extremely Large Telescope - ELT), à construire d'ici 2025, atteindra des diamètres jusqu'à 40 m.

Mais si le premier objectif est atteint simplement par l'augmentation de la surface, la satisfaction du second est plus difficile. En effet, l'atmosphère terrestre est le si ge de déplacements de masses d'air à différentes températures, et leur mélange turbulent induit des fluctuations d'indice optique le long de la ligne de visée et donc des fluctuations de surface d'onde. Ces dernières entraînent une perte significative en résolution angulaire : un télescope professionnel ne délivre que la résolution d'un télescope amateur de 20 cm. La largeur de l'image d'une étoile, appelée *seeing*, est ainsi de l'ordre de 0,5 seconde d'angle pour les meilleurs sites astronomiques.

Depuis près de 30 ans, l'optique adaptative (OA) se développe en astronomie pour corriger les effets de la turbulence atmosphérique et recouvrer la limite de diffraction des grands télescopes au sol. Récemment, les OAs grand champ avec étoiles laser s'appuyant sur la tomographie de l'atmosphère ont été démontrées dans plusieurs observatoires pour offrir une correction dans un champ de vue accru et une bonne couverture du ciel. Ces techniques sont aujourd'hui étendues pour satisfaire les besoins des extrêmement grands télescopes qui verront le jour au milieu des années 2020.

Rappelons que la limite théorique de la diffraction est λ/D , où λ est la longueur d'onde d'observation, D le diamètre du télescope. Cette limite vaut 10 millisecondes d'angle pour un télescope de 10 m observant dans le domaine visible.

Pour recouvrer cette limite, il faut corriger les effets de la turbulence atmosphérique par optique adaptative (OA), une technique initialement proposée dans les années 50 mais seulement mise en œuvre en astronomie à partir des années 80 [1]. Pour ce faire, un miroir, conjugué de la pupille du télescope, est déformé par des moteurs pilotés en temps réel pour compenser les avances ou retards de phase introduits par la turbulence. Les commandes envoyées aux moteurs sont déterminées à partir de mesures faites par un analyseur de surface d'onde (ASO) observant une étoile de référence.

Depuis la première démonstration, l'OA a connu un développement très rapide, et aujourd'hui la quasi-totalité des grands télescopes en sont équipés. Cependant, l'OA classique (ou *single conjugate AO* - SCAO), est fortement limitée par l'anisoplanétisme (voir plus loin) et les corrections apportées par la plupart des systèmes d'OA actuellement en opération sont limitées à l'étude d'objets relativement compacts et brillants. Cette limitation est surmontée par des nouveaux concepts, nommés OA grand champ (voir *figure 1*), qui s'appuient sur la tomographie de l'atmosphère et les étoiles laser (voir *encadré*). Les corrections par l'OA grand champ ouvrent ainsi la possibilité d'observer à haute résolution un nombre beaucoup plus important d'objets astronomiques, en particulier très étendus et/ou à faible brillance de surface (typiquement les galaxies).

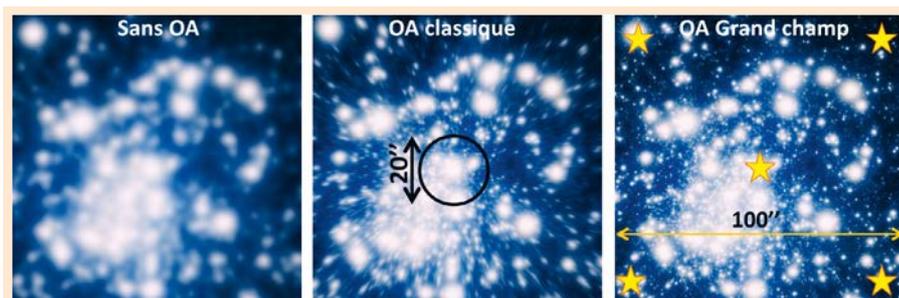


Figure 1. Comparaison d'images obtenues en proche infrarouge respectivement sans OA, avec une correction apportée par une OA classique (SCAO) sur 20'' en utilisant une étoile naturelle de référence sur l'axe et avec une OA grand champ sur 100'' en utilisant 5 étoiles laser.

Champ corrigé et couverture de ciel

La mesure des aberrations atmosphériques peut se faire soit directement sur l'objet d'intérêt si celui-ci est suffisamment brillant, soit sur une étoile proche de celui-ci.

Magnitude limite

Intéressons-nous à la luminosité minimale requise par une étoile (dite magnitude limite) pour pouvoir servir de source de référence en OA. Les mesures fournies par l'ASO doivent s'effectuer à un rythme plus rapide que le temps caractéristique d'évolution de la turbulence, c'est-à-dire de l'ordre de la milliseconde. Par ailleurs, la qualité de la reconstruction du front d'onde – autrement dit le calcul temporel de la forme à appliquer au miroir déformable – est principalement dégradée par le bruit de photons. Une bonne mesure du front d'onde nécessite environ 100 photons détectés par pose et point de mesure de l'ASO. Une étoile de magnitude 0 (telle que Véga) nous envoie environ 10^{10} ph/s/m², si bien qu'uniquement les étoiles les plus brillantes (de magnitude ≤ 11) peuvent servir à la mesure des aberrations atmosphériques. Dans le cas de galaxies lointaines par exemple, leur faible brillance de surface rend nécessaire l'utilisation d'une autre référence pour l'ASO.

L'étoile laser



Le principe consiste à propager, depuis le télescope, un laser à une longueur d'onde de 589 nm accordée sur la raie D2 du sodium. Cette lumière laser est absorbée, puis réémise, par la couche d'atomes de sodium localisée dans la haute atmosphère à environ 90 km. La tache lumineuse ainsi créée dans la couche a une largeur de l'ordre de 40 cm. La lumière réémise est utilisée comme étoile de référence par l'ASO [6]. Pour les OA grand champ, plusieurs étoiles laser sont nécessaires pour réaliser la tomographie de l'atmosphère (cf. figures 1 et 2).

Figure 2. Photo du système d'étoiles laser utilisé pour la GLAO et la LTAO de l'AOF du Very Large Telescope. (Crédit : ESO)

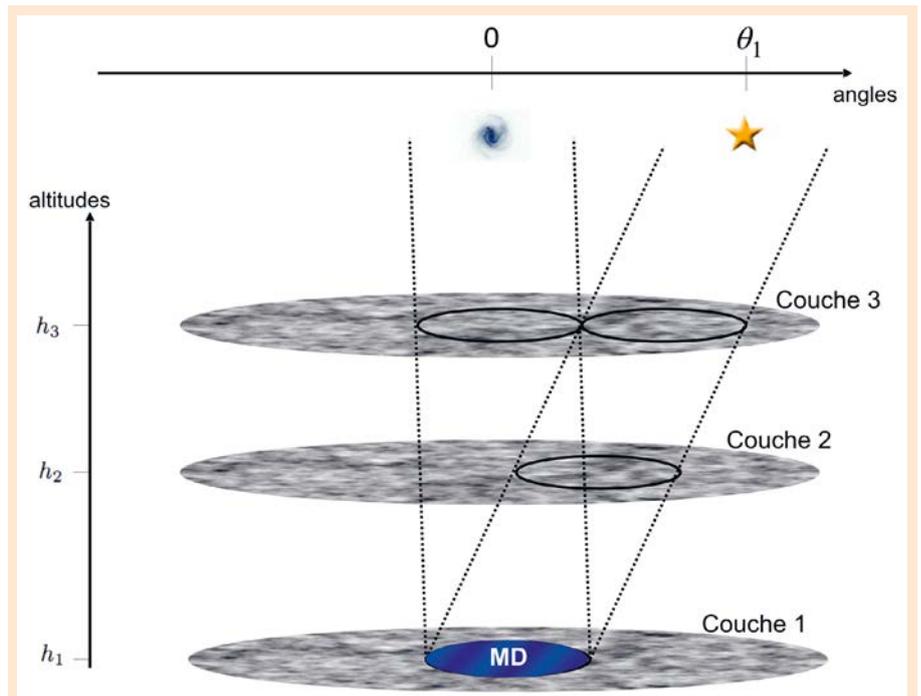


Figure 3. Illustration de l'anisoplanétisme. L'atmosphère est représentée par trois couches aux altitudes h_1 (pupille du télescope incluant le miroir déformable MD), h_2 et h_3 . La mesure des aberrations atmosphériques effectuée dans la direction θ ne correspond pas tout à fait aux aberrations vues par l'objet d'intérêt au centre du champ.

Champ limite (anisoplanétisme)

Intéressons-nous alors à l'angle maximum sur le ciel dans lequel une source de référence doit se situer par rapport à l'objet observé pour permettre une correction par OA, aussi appelé angle isoplanétique. Du fait de la distribution en altitude de la turbulence,

deux fronts d'ondes provenant de deux sources séparées angulairement ne traversent pas le même volume d'atmosphère (voir figure 3). L'angle d'isoplanétisme (θ_0) caractérise la limite de corrélation des deux fronts d'ondes. Il est relativement petit et fortement chromatique. Pour des sites astronomiques de bonne qualité, l'angle isoplanétique est de l'ordre de 2 à 5 secondes d'angle pour le domaine visible, et de 10 à 30 secondes d'angle pour le proche infrarouge (figure 1).

Couverture de ciel

En combinant la magnitude limite et l'angle isoplanétique, on peut calculer la surface du ciel qui pourrait être observée à la limite de diffraction des grands télescopes. On parle de couverture du ciel : pour l'OA classique (SCAO), celle-ci ne dépasse pas 1 %. Afin de s'affranchir de l'anisoplanétisme, il est nécessaire d'avoir recours aux techniques de tomographie atmosphérique. Mais ce n'est pas suffisant pour augmenter significativement la couverture du ciel et les astronomes ont inventé les

étoiles artificielles créées par laser afin de pallier le manque d'étoiles lumineuses (voir encadré). Ces étoiles laser peuvent être ainsi positionnées dans la direction de l'objet observé [6]. Cependant du fait de la distance finie de l'étoile laser, une décorrélation des fronts d'onde laser avec ceux de l'objet à l'infini existe et pour compenser cette limitation, là aussi la tomographie est très utile.

Tomographie atmosphérique et OA grand champ

En combinant les mesures acquises sur plusieurs étoiles de référence naturelles ou laser, observées en parallèle, et ce dans un champ plus grand que θ_0 , il est possible de remonter à une information sur l'ensemble du volume de turbulence au-dessus du télescope par tomographie. Différents concepts d'OA grands champ sont alors possibles.

Principe de la tomographie et reconstruction du front d'onde

Les premières idées d'OA grand champ par tomographie sont apparues dans les années 70 et 80, mais la première démonstration date de

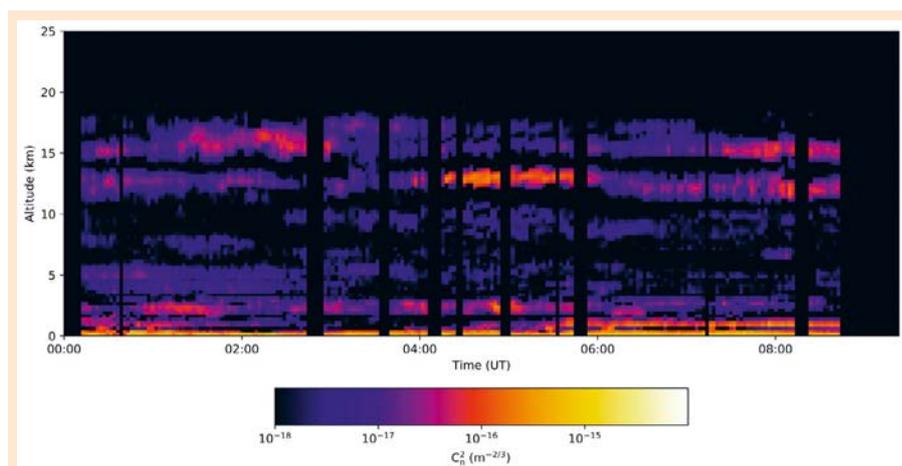


Figure 4. Exemple de mesure du profil de turbulence au-dessus de l'observatoire Paranal (Chili). L'intensité de la turbulence est codée en couleur (bleu = faible perturbation, rouge = forte perturbation). L'axe vertical donne l'altitude des couches, alors que l'axe horizontal montre l'évolution au cours d'une nuit. Quelques couches seulement décrivent l'atmosphère, notamment proche du sol ou à des altitudes bien définies. (Crédit : J. Osborn [7])

2007 [2]. Comme en imagerie tomographique médicale, il s'agit de reconstruire un signal à 3 dimensions, le volume turbulent au-dessus du télescope, à partir des projections de ce signal observées dans les différentes directions des ASOs. L'atmosphère est un milieu continu, cependant, l'hypothèse réalisée en OA tomographique est que ce milieu est constitué d'une superposition de 5 à 20 couches turbulentes statistiquement indépendantes les unes des autres. Cette hypothèse est justifiée par des campagnes de mesure

de profils atmosphériques au-dessus des grands sites astronomiques. La figure 4 montre l'existence de quelques couches dominantes au-dessus de l'observatoire Paranal (Chili) et leur évolution au cours d'une nuit.

La tomographie (voir figure 5) consistera en premier lieu à reconstruire ces couches turbulentes dominantes, à partir d'un nombre limité de mesures, typiquement sur 3 à 6 étoiles de référence. Puis le volume turbulent sera projeté dans les directions d'intérêt pour calculer les déformations à appliquer aux miroirs

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

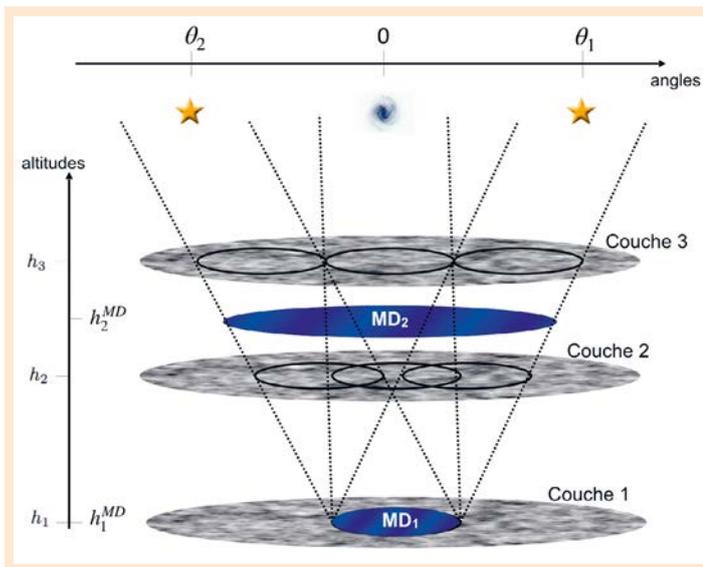


Figure 5. Illustration du principe de tomographie en astronomie. Les mesures effectuées sur les étoiles de référence dans les directions θ_1 et θ_2 servent à estimer la turbulence dans la direction d'intérêt au centre et à la projeter sur les deux miroirs adaptatifs (MD) conjugués dans le volume atmosphérique.

déformables du système d'OA, conjugués de la pupille et à des altitudes bien choisies dans l'atmosphère. Pour ce faire, la tomographie s'appuie sur les relations géométriques liant directions de mesure, altitudes des couches, directions d'intérêt et altitudes des miroirs adaptatifs et sur les propriétés statistiques de la turbulence, dans chaque couche, représentées par les corrélations spatiales des fronts d'onde liées au spectre de Kolmogorov¹. De la qualité du modèle ainsi défini, dépend la qualité de la reconstruction. Sa mise à jour pendant les observations est cruciale (cf. figure 4) et elle peut se faire à partir des mesures mêmes fournies par les ASOs ou/et d'une mesure sur site du profil de turbulence pendant la nuit.

Les systèmes d'OA grand champ s'appuient tous sur l'utilisation d'étoiles laser pour assurer la

couverture du ciel et disposer des mesures de front d'onde dans les directions propices à une bonne reconstruction tomographique. Ces étoiles sont généralement placées en périphérie du champ d'intérêt à une distance du centre de l'ordre de 1 à 2 minutes d'angle (cf. figure 1).

Les OA grand champ

En fait, il coexiste plusieurs stratégies en OA grand champ pour piloter le/les miroirs déformables du système, selon les applications scientifiques visées.

Une première approche consiste simplement à moyenner les signaux provenant des ASOs. Pour les couches atmosphériques situées à haute altitude, le signal mesuré correspond à des fronts d'onde décorrélés, leur moyenne sera nulle. Pour les couches atmosphériques proches du sol (là

où la turbulence est la plus forte), le signal est fortement corrélé. Si on pilote un miroir déformable conjugué de la pupille à partir de ces mesures moyennées, l'essentiel de la correction porte sur les couches près du sol. On parle alors de GLAO (pour *ground layer AO*). La GLAO permet d'améliorer la résolution angulaire d'un facteur 2 ou 3 par rapport à des observations limitées par la turbulence, sur des champs de plusieurs minutes d'angle. Si la taille du champ à corriger décroît, la performance s'améliore, jusqu'à atteindre la limite de diffraction dans le cas d'un champ de l'ordre de θ_0 . On parle alors de LTAO, pour *laser tomography AO*. Le champ corrigé est limité à quelques dizaines de secondes d'angle dans l'infrarouge proche, avec une couverture de ciel pouvant atteindre jusqu'à 80 %. Ces deux techniques associées à l'instrument MUSE (figure 2) sont mises en œuvre au VLT de l'ESO en utilisant un miroir secondaire adaptatif dans le télescope [3].

Afin d'accroître la taille du champ corrigé tout en atteignant la limite de diffraction, il est nécessaire d'augmenter le nombre de miroirs déformables. Une première possibilité consiste à utiliser 2 ou 3 miroirs déformables en série le long du trajet de propagation, avec une conjugaison optique aux altitudes des couches turbulentes dominantes (cf. figure 5). La correction est ainsi opérée directement à la source des perturbations, ce qui fournit à la fois un champ de correction accru par rapport à l'OA classique et des performances bien meilleures qu'en GLAO.

	SCAO	GLAO	MCAO	LTAO	MOAO
Champ observable	10" à 20"	5' à 10'	1' à 2'	10" à 20"	5' à 10'
Champ corrigé	Tout le champ observable	N sous-champs de 10" à 20" chacun			
Résolution obtenue sur un 8 m à 1,65 mm	0,04" (diffraction)	Entre 0,2" et 0,3"	0,04" (diffraction)	0,04" (diffraction)	Entre 0,04" et 0,12"
Résolution obtenue sur un 40 m à 1,65 mm	0,008" (diffraction)	Entre 0,2" et 0,3"	0,008" (diffraction)	0,008" (diffraction)	Entre 0,008" à 0,024"

Tableau 1. Les différents types d'OA et leurs performances en champ et résolution angulaire pour deux télescopes de 8 et 40 m de diamètre.

¹ Le spectre de la turbulence est donné par une loi de puissance en $-11/3$ sur les fréquences spatiales selon le modèle de Kolmogorov s'appuyant sur une cascade d'énergie allant de son injection par les plus gros tourbillons jusqu'à sa dissipation par frottement visqueux au niveau des plus petits.



Figure 6. Vue d'artiste de l'ELT de l'ESO et de ses faisceaux laser. (Crédit : ESO)

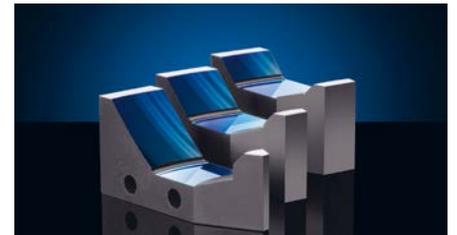
On parle alors d'OA multi-conjuguée ou MCAO. Un tel système a été mis en service en 2012, au télescope Gemini-Sud de 8 m, c'est l'instrument GeMS [4].

Une autre possibilité consiste à utiliser plusieurs miroirs déformables, mais cette fois-ci en parallèle, chacun apportant une correction pour chaque objet d'intérêt au sein du champ défini par les ASOs. On parle alors d'OA multi-objet ou MOAO. La MOAO permet d'atteindre une bonne performance en quelques points dans un champ beaucoup plus large que la MCAO. En revanche, le champ de correction autour de chaque point est limité par l'anisoplanétisme. La démonstration de ce concept a été faite en 2010 sur un télescope de 4 m aux îles Canaries [5].

Les OA grand champ dans la perspective de l'ELT

Aujourd'hui, l'OA grand champ entre en opération routinière dans quelques observatoires à travers le monde. La correction apportée permet déjà de franchir un pas important pour assurer la haute résolution angulaire en astronomie. Mais il reste encore beaucoup de travaux à mener afin d'en optimiser les performances en fonction des conditions d'observation. La prochaine grande étape concerne la future génération des ELTs (figure 6). En effet, tous les ELTs seront équipés d'OA grand champ, et ce dès leur première lumière. Le succès scientifique de ces futurs géants repose donc sur le principe même de la tomographie de l'atmosphère.

Edmund Optics® (EO) conçoit et fabrique des composants spécifiquement pour diverses applications laser, notamment pour le traitement de matériaux, les dispositifs médicaux, les vidéoprojecteurs, et la détection pendant les mesures dynamiques. Grâce à un équipement haut de gamme, dont plusieurs chambres de traitement avec déposition assistée par ions ou par pulvérisation ionique (IBS) et la finition magnétorhéologique (MRF), EO fabrique des optiques laser de haute qualité telles que des miroirs, des asphères et expanseurs de faisceaux laser. De nombreuses méthodes de métrologie optique, notamment la spectroscopie à cavité optique (CRDS), l'interférométrie et la microscopie à contraste interférentiel (DIC), garantissent que tous les composants sont conformes aux spécifications indiquées.



Une de nos nouvelles additions les plus innovantes est la famille d'Expanseurs de Faisceau Réfléchissants Monolithiques TECHSPEC®. Ces composants fraisés au diamant sont parfaitement adaptés pour l'expansion de faisceau à large bande ou achromatique, ainsi qu'une grande variété de sources lumineuses. Avec une distorsion du front d'onde minimale et une conception achromatique entièrement réfléchissante, ils peuvent être utilisés avec des lasers réglables, ultraviolets et à impulsions ultracourtes. Leurs plans réfléchissants, trous filetés et traversants simplifient grandement leur montage, alignement et intégration dans toute application laser. La construction monolithique garantit également une stabilité et une performance non perturbées par les variations de température.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] Rousset G. et al., First diffraction-limited astronomical images with adaptive optics, *Astronomy & Astrophysics*, **230**, L29 (1990)
- [2] Marchetti E. et al., MAD on sky results in star-oriented mode, *Proc. SPIE* Vol. **7015**, 70150F, (2008)
- [3] Madec P.-Y. et al., Adaptive Optics Facility: control strategy and first on-sky results of the acquisition sequence, *Proc. SPIE* Vol. **9909**, 99090Z (2016)
- [4] Neichel B. et al., Gemini multiconjugate adaptive optics system review - II. Commissioning, operation and overall performance, *MNRAS*, **440**, 1002 (2014)
- [5] Gendron E. et al., MOAO first on-sky demonstration with CANARY, *Astronomy & Astrophysics*, **529**, L2 (2011)
- [6] Wizinowich P. et al., Adaptive optics developments at Keck Observatory, *Proc. SPIE* Vol. **5490** (2004)
- [7] Osborn J. et al., Optical turbulence profiling with Stereo-SCIDAR for VLT and ELT, *MNRAS*, **478**, 825 (2018)

CONTACT

EDMUND OPTICS SARL
 Bâtiment le Silex 1, 15 rue des
 Cuirassiers, 69487 Lyon Cedex 03
 Tél : +33 (0) 820 207 555
sales@edmundoptics.fr
www.edmundoptics.fr