



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Mécanique

Thierry Fusco

Optique adaptative et télescopes géants

Volume 351, Special Issue S4 (2023), p. 81-89

Published online: 8 August 2023

Issue date: 15 September 2023

<https://doi.org/10.5802/crmeca.218>

Part of Special Issue: Hommage à Ismaël Boulliau

Guest editor: Bruno Chanetz (ONERA, BP 80100, 91123 Palaiseau Cedex, France)



This article is licensed under the
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*

www.centre-mersenne.org

e-ISSN : 1873-7234



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

Optique adaptative et télescopes géants

Adaptive optics and extremely large telescopes

Thierry Fusco^{® a}

^a Département d'Optique et Techniques Associées, ONERA, Université Paris-Saclay, France

Courriel: thierry.fusco@onera.fr

Résumé. L'optique adaptative, installée sur tous les très grands télescopes astronomiques, permet de s'affranchir des limitations imposées par les perturbations de la turbulence atmosphérique. Cet article présente l'état de l'art du domaine pour les applications astronomiques et comment l'optique adaptative a révolutionné l'observation astronomique depuis le sol ces vingt dernières années en relevant d'innombrables défis scientifiques et techniques. Nous présentons enfin comment le concept va être appliqué, à l'horizon 2030 sur les futurs télescopes géants afin de répondre à certaines des questions les plus fondamentales de l'astronomie concernant la naissance de l'univers ou l'existence de la vie hors du système solaire.

Abstract. Adaptive optics (AO), now installed on all the astronomical ground-based telescopes, make it possible to overcome the angular resolution limitations imposed by atmospheric turbulence. This article presents the state-of-the-art in the field of astronomical applications, and shows how adaptive optics has revolutionized ground-based astronomical observation over the last twenty years, overcoming countless scientific and technical challenges. Finally, we present how the concept will be applied, by 2030, on future giant telescopes to answer some of astronomy's most fundamental questions concerning the birth of the universe or the existence of life outside the solar system.

Mots-clés. Astronomie, Télescope, Turbulence, Optique adaptative, Analyse de surface d'onde.

Keywords. Astronomy, Telescope, Turbulence, Adaptive optics, Wave-front sensing.

Published online: 8 August 2023, *Issue date*: 15 September 2023

1. Les télescopes astronomiques : une course au gigantisme depuis plus de 4 siècles

Depuis les premières observations de Galilée en 1609 avec la toute première lunette astronomique de quelques centimètres de diamètre, conçue par l'opticien néerlandais Hans Lippershey, la taille des instruments d'observation (lunettes utilisant des lentilles puis télescopes utilisant des miroirs) n'a cessé de croître pour atteindre aujourd'hui des diamètres de l'ordre de 10 mètres avec en projet, à l'horizon 2030, des télescopes géants atteignant des diamètres proches de 40 m. Les plus grands télescopes optiques d'aujourd'hui, construits vers le milieu des années 1990 font entre huit et dix mètres de diamètre. Avec les télescopes géants du futur, les ELTs (pour *Extremely Large Telescopes*), le diamètre va augmenter d'un facteur trois à quatre en moins de 25 ans.

Cette croissance importante (quasi logarithmique en fonction du temps) a deux principaux buts : augmenter le flux total collecté, réduisant par là même le bruit de photons qui représente la

limite fondamentale de toute observation et améliorer la résolution angulaire sur l'objet observé. Si le premier objectif est atteint (le nombre de photons collectés augmente avec le carré du diamètre du télescope), il n'en est, hélas, pas de même pour la résolution angulaire. En effet, la présence de l'atmosphère terrestre limite de manière importante cette résolution. Cette dernière ne dépasse jamais la résolution théorique d'un télescope de quelques dizaines de centimètres aux longueurs d'onde optique et ce, quel que soit le diamètre considéré [1]. L'onde optique émise par l'objet d'intérêt est perturbée par les fluctuations d'indice de réfraction de l'air dans l'atmosphère. Ces perturbations entraînent un élargissement de la tache image au foyer du télescope ce qui introduit, *in fine*, une perte sensible de performance. Ainsi la résolution obtenue, dépendant de la longueur d'onde d'observation, peut être plusieurs dizaines de fois inférieures à la résolution théorique attendue et constitue une limitation fondamentale à l'observation astronomique au sol.

2. L'optique adaptative, une révolution pour l'astronomie

En 1953, Horace Babcock [2] propose une technique, appelée Optique Adaptative (OA), pour compenser partiellement cet effet en temps réel. Tout d'abord réservée au domaine militaire (en particulier pour la focalisation de faisceau Laser), il aura fallu attendre plus de 35 ans pour que cette idée soit mise en pratique en astronomie, sous l'impulsion de Pierre Léna à l'Observatoire de Paris et Gérard Rousset à l'ONERA sur le télescope de 1,52 m de l'Observatoire de Haute Provence puis sur celui de 3,6 m de l'*European Southern Observatory* (ESO) à la Silla (Chili) [3].

Aujourd'hui, tous les grands télescopes au monde, de la classe des 8–10 m de diamètre, sont équipés d'OA. Dans ces systèmes temps réels, qui fonctionnent en boucle fermée à l'aide d'une étoile appelée « étoile guide », l'onde réfléchie sur le miroir déformable est envoyée à un analyseur de surface d'onde (ASO). Les aberrations résiduelles mesurées par l'ASO sont utilisées pour contrôler le miroir déformable placé généralement dans un plan pupillaire. L'OA est, sans aucun doute, LA solution pour l'observation astronomique à haute résolution depuis le sol et demeure un complément indispensable aux observatoires spatiaux (Hubble, *James Webb Space Telescope* ou JWST, etc.). Tous les nouveaux projets de télescopes incluent désormais l'OA dès les tout premiers stades de leur conception, certains comme le futur *European-Extremely Large Telescope* (ELT) de 39 m de diamètre de ESO intègrent l'OA dans le télescope lui-même en amont des instruments scientifiques.

Ainsi, depuis plus de trente ans, l'OA trouve dans l'astronomie depuis le sol aux longueurs d'onde visibles et infrarouges un domaine applicatif idéal, avec des retombées astronomiques et astrophysiques importantes, comme les mesures ultra-précises d'orbites d'étoiles proches pour étudier les caractéristiques physiques du trou noir central de notre Galaxie (prix Nobel de physique 2020¹) ou encore la détection directe et la caractérisation spectrale de planètes extrasolaires.² Une revue de l'Optique Adaptative pour l'Astronomie pourra être trouvée dans [4].

3. SPHERE-SAXO, le système d'OA pour l'astronomie le plus performant au monde

Après le succès de NAOS [5], la première OA généraliste du VLT (*Very Large Telescope*), qui a permis une première démocratisation du concept pour l'astronomie avec, à son actif, un rôle clé dans des découvertes majeures comme la toute première image d'une planète extrasolaire ou encore la mesure précise de la masse du trou noir centrale de notre Galaxie, la seconde

¹<https://www.defense.gouv.fr/english/actualites/articles/un-instrument-d-optique-concu-par-l-onera-au-coeur-des-observations-d-un-des-laureats-du-prix-nobel-de-physique-2020>.

²<https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/laureats-du-grand-prix-scientifique-de-la-fondation-charles-defforey>.

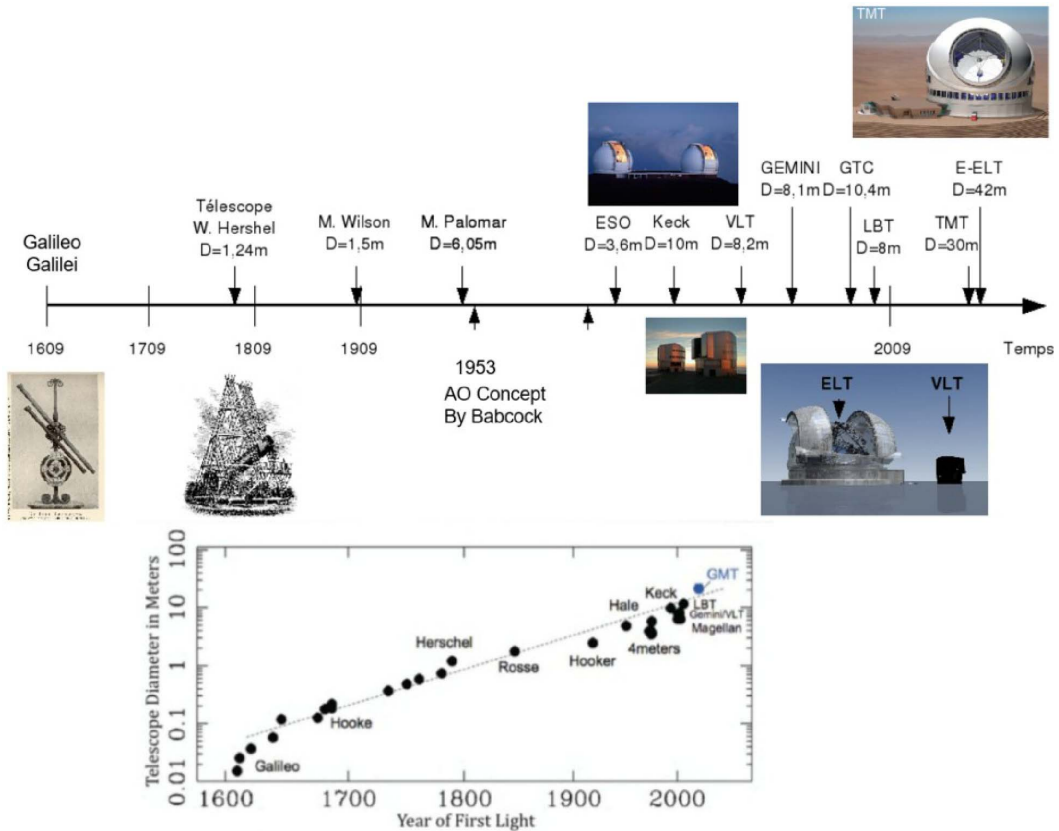


FIGURE 1. Evolution du diamètre des télescopes depuis les premières observations de Galilée.

génération d'instruments assistés par OA a eu pour ambition de repousser les limites de qualités des images et de leur contraste. Ainsi le 4 mai 2014, après plus de 10 ans de développements menés conjointement entre les laboratoires CNRS (observatoire de Grenoble, Marseille et Paris), l'ONERA et des partenaires européens, allemands (Max Planck Institute), italiens (INAF), suisses (ETH Zurich) et coordonnés par l'ESO, l'instrument SPHERE (*Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch*) pour le VLT a vu le jour. Dédié à la recherche et la caractérisation de planètes extrasolaires SPHERE [6] et son système d'OA (dit extrême) SAXO [7, 8] intègre alors les innovations conceptuelles et technologiques les plus avancées dans le domaine (voir Figures 1 à 3). Avec sa correction quasi parfaite des effets de la turbulence permettant d'atteindre la limite de diffraction d'un télescope de 8 m jusqu'aux longueurs d'onde visibles (soit moins de 20 millisecondes d'arc équivalent à 90 nanoradians), SPHERE-SAXO est alors sans nul doute le système d'OA le plus performant au monde. Avec ce type de système, il est possible de détecter un objet (idéalement une planète) très faible, proche d'une étoile brillante (typiquement un rapport de flux d'un million pour une séparation angulaire de l'ordre de quelques dixièmes de seconde d'arc). A titre de comparaison cela revient à observer un phare à Marseille depuis Paris et chercher à distinguer une bougie située à quelques dizaines de centimètres de ce phare.

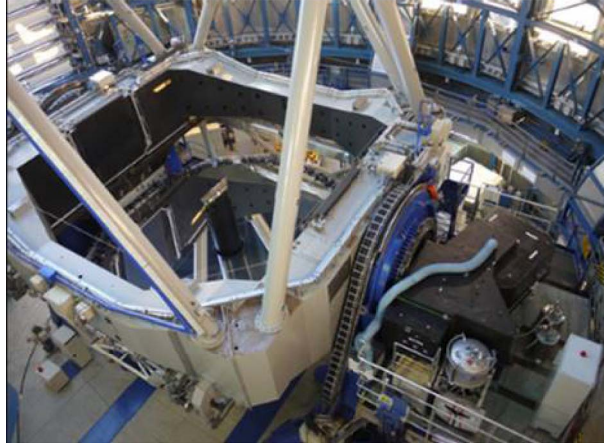


FIGURE 2. L'instrument SPHERE installé au foyer Nasmyth du VLT.

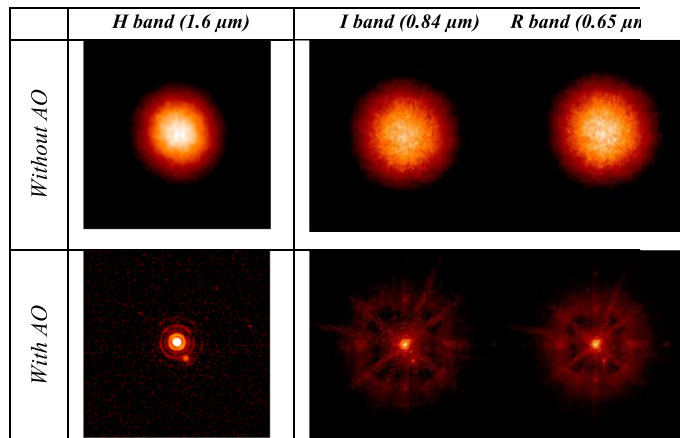


FIGURE 3. Les performances de SPHERE obtenues sur le ciel du proche IR (bande H) au visible (bande R). La limite de diffraction du télescope est atteinte dans tous les cas.

Les ingrédients clés pour permettre un tel exploit sont :

- L'analyse du front d'onde : les approches d'analyse de front d'onde conventionnelles, telles que mises en œuvre sur NAOS, par exemple, ne fonctionnent pas assez bien pour répondre aux exigences SPHERE en termes de précision et de sensibilité ultimes. Il a donc fallu proposer des modifications de différents concepts (notamment du Shack-Hartmann) afin d'améliorer les performances ultimes et de gagner l'ordre de grandeur nécessaire pour atteindre les spécifications imposées par l'imagerie à haute dynamique [9].
- Le contrôle : prise en compte et correction des vibrations du télescope [10].
- La calibration du système : pré-compensation des aberrations non vues par le système AO, entre autres) [11].

Depuis son ouverture à la communauté en 2015, SPHERE a permis une production scientifique d'ampleur avec plus de 200 publications dans des revues prestigieuses (Nature, A&A, MNRAS etc.).

L'expérience unique de SPHERE-SAXO a permis d'identifier les nouveaux défis et les nouvelles voies de développement pour les futurs instruments d'imagerie et de caractérisation des planètes extrasolaires. En particulier, elle a permis de lancer de nouvelles recherches concernant l'analyse de surfaces d'onde pour développer de nouveaux dispositifs ultrasensibles (domaine de très faible nombre de photons) et ultra précis (précision nanométrique) [12].³

Pousser les recherches dans les domaines de l'OA, combiner des concepts optiques innovants avec des techniques de détection et de contrôle de plus en plus sophistiquées, le tout étant lié et optimisé avec les approches les plus avancées d'intelligence artificielle et d'apprentissage machine profond nous permettra de gagner les 5 ordres de grandeur nécessaires à la détection d'exo-terres à l'horizon 2035 (avec la 2^{ème} génération d'instruments ELT, voir ci-dessous).

4. Les nouveaux télescopes géants : nouveaux défis, nouvelles solutions

La prochaine décennie verra l'avènement des télescopes géants. Avec un diamètre pouvant aller jusqu'à 39 m pour le télescope européen (ELT),⁴ ces télescopes [13, 14], ayant une surface collectrice près de 13 fois supérieure⁵ à la génération actuelle, vont révolutionner l'astronomie au sol. L'Europe a acquis ses galons en construisant les meilleurs télescopes optiques du moment : les quatre télescopes de huit mètres de diamètre du VLT installé dans le désert d'Atacama au Chili. Elle pourrait maintenir sa position de leader grâce à l'ELT, actuellement en construction à quelques dizaines de kilomètres seulement du VLT. Ce dernier près de deux fois plus grand en surface que les projets concurrents américains, devrait observer ses premiers photons avant la fin de la décennie. Ce projet est porté par l'ESO qui opère le VLT pour la communauté des astronomes de ses seize états membres. L'ELT permettra des progrès considérables et décisifs sur de nombreuses questions astrophysiques touchant aux origines de la vie, des planètes, des étoiles, des galaxies et de l'Univers dans son ensemble, en permettant d'investiguer en détail les atmosphères des planètes extrasolaires, de détecter d'éventuelles petites planètes rocheuses comparables à la Terre, de caractériser les premières galaxies aux confins de l'Univers et de comprendre comment ces galaxies ont évolué chimiquement et dynamiquement jusqu'à former celles que nous connaissons aujourd'hui... Mais l'ELT s'attaquera également à des questions de physique fondamentale comme la vitesse d'éloignement des galaxies les unes par rapport aux autres, la potentielle variation des constantes de la physique au cours des âges cosmiques, les lois de la physique autour du trou noir de notre galaxie et des trous noirs super massifs présents dans de nombreuses galaxies...

La diversité des thèmes astrophysiques et des besoins d'observation associés fait de l'OA un élément indispensable qui se situe maintenant au cœur même de ces télescopes (voir Figure 4). Au-delà de la correction de la turbulence atmosphérique elle-même, le nouveau défi à relever sera la capacité à gérer les défauts introduits par le télescope lui-même. Le dôme, d'une hauteur de 74 m, aura une base circulaire au sol de 89 m de diamètre, soit une surface équivalente à celle d'un terrain de foot, pour une masse totale de 5 000 tonnes, le tout rempli de structures qui généreront leur propre turbulence locale. Le miroir primaire sera composé 798 segments hexagonaux de 1,4 m de diamètre qu'il faudra positionner les uns par rapport aux autres avec des précisions sub-micrométriques. L'ELT intègre un miroir secondaire convexe de plus de 6 m de diamètre et un miroir déformable de 4,2 m de diamètre composé de près de 5 000 actionneurs fonctionnant à plus d'un kilohertz. La combinaison de la taille titanesque des optiques et des besoins extrêmes en termes de précision (nanométrique) fait de l'optique adaptative pour les ELT

³Voir <https://anr-wolf.com/>.

⁴Ses concurrents américains GMT et TMT faisant respectivement 24 et 30 m de diamètre.

⁵L'ELT collectera 100 millions de fois plus de lumière qu'un œil humain et 256 fois plus que le télescope spatial Hubble et 35 fois celle du JWST.

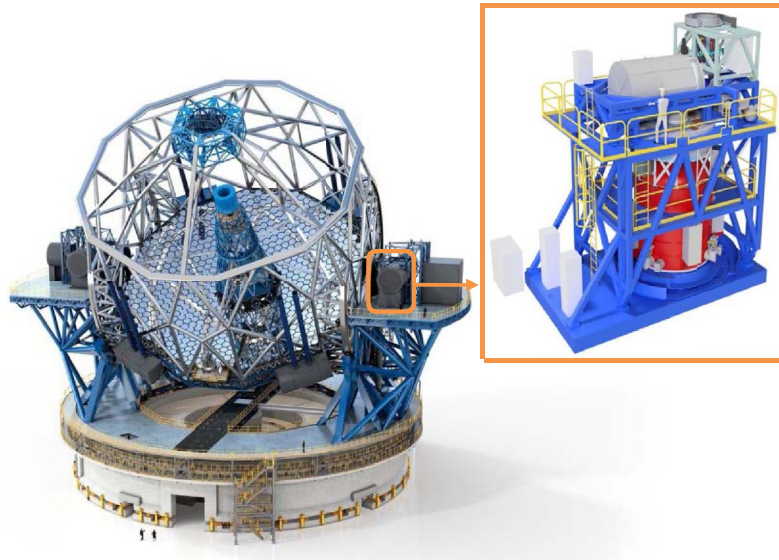


FIGURE 4. (Gauche) l'ELT : un Dôme de 74 m de haut, une base de 89 m de diamètre, 5 000 tonnes, un miroir primaire de 39 m de diamètre composé de 798 segments hexagonaux de 1.4 m positionnés avec une précision sub-micrométrique. (Droite) L'instrument HARMONI $10 \times 5 \times 8 \text{ m}^3$, 35 tonnes. Spectro-Imageur de première lumière de l'ELT. Instrument à haute résolution spatiale et spectrale. Il intègre 2 systèmes d'OA (dont un tomographique Laser fonctionnant avec 6 étoiles artificielles) et un imageur hyper-spectral fonctionnant dans le visible et dans l'Infra-Rouge (de 0.45 à $2.2 \mu\text{m}$) qui allie résolution spatiale (jusqu'à des pixels de 4 millisecondes d'arc⁶) et spectrale (avec une résolution pouvant évoluer entre 3 000 et 20 000 selon les besoins).

un défi scientifique, technologique et instrumental immense. Les problématiques conceptuelles combinées aux contraintes d'ingénierie sont aujourd'hui le quotidien des chercheurs, ingénieurs et techniciens qui travaillent à la conception et la réalisation des futurs instruments d'Optique Adaptative de l'ELT.

Déjà source de limitation de la qualité d'image pour des télescopes de 8 m de diamètre, les effets perturbateurs de la turbulence atmosphérique sont accrus sur l'ELT en étalant la lumière sur une tache focale plusieurs dizaines de fois plus large que la limite de diffraction d'un télescope de 39 m. Ainsi le télescope lui-même va être rendu « adaptatif » grâce à un miroir déformable de 2,4 m situé dans son train optique. Ce miroir sera contrôlé par des données provenant du télescope lui-même mais aussi des instruments scientifiques qui seront tous de systèmes de mesures de la surface d'onde pour contrôler ce miroir déformable à une cadence de plusieurs centaines de hertz. Pour certains instruments des correcteurs spécifiques seront mis en place pour améliorer encore leurs performances finales en fonction de leurs besoins scientifiques (imagerie haut contraste, correction sur un grand champ...). L'objectif final étant d'atteindre la limite ultime de la diffraction pour un télescope de 39 m de diamètre, à savoir 4 millisecondes d'arc (mas) dans le visible (700 nm) et 12 mas dans l'infrarouge (2 200 nm).

⁶4 millisecondes d'arc correspondent à 20 nano-radians ou encore à la taille angulaire d'une pièce de 1 euro située à Marseille et observée depuis Paris.

Quelles que soient leurs caractéristiques, ces systèmes auront des contraintes et des problématiques communes, la première étant leur limitation en termes de couverture de ciel, c'est-à-dire du nombre de sources observables. En effet, la lumière provenant de l'objet d'étude étant généralement trop faible pour permettre une mesure de front d'onde pertinente, on utilise une étoile brillante voisine, quand celle-ci existe, ou plus souvent plusieurs étoiles guides artificielles, créées par laser, afin de mesurer la distorsion atmosphérique.

L'ELT utilisera pleinement cette technique en bénéficiant d'au moins six lasers créant une constellation d'étoiles nécessaire à une correction efficace sur un grand champ de vue.

De nombreux prototypes sont déjà en cours de développement en laboratoire ou dans l'industrie afin de prouver la faisabilité technologique des composants clés des systèmes d'optique adaptative requis pour l'ELT, notamment :

- un laser continu Raman fibré émettant à 589 nm une puissance d'au moins 50 W ;
- un miroir déformable de plus de 2,50 m inclus dans le train optique du télescope. Avec plus de 5 000 points d'actionnements permettant des déformations supérieures à 50 μm à une fréquence de plus de 1 kHz ;
- des mini ou micro-miroirs déformables (de quelques dizaines de centimètres) mais comportant jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'actionneurs et fonctionnant à plusieurs milliers de Hertz ;
- de grandes matrices de détecteurs (jusqu'à 1 mégapixel) très rapides (de plusieurs centaines à de hertz) et à très faible bruit (moins de quelques électrons de bruit de lecture) pour le visible et le proche infrarouge ;
- des calculateurs temps réel ultrarapides, capables d'absorber le flot d'information nécessaire au contrôle des miroirs déformables.

La combinaison de l'ensemble de ces briques de base permettra à l'ELT de disposer de différents concepts d'optiques adaptatives s'adaptant aux divers instruments scientifiques et donc aux différents besoins astrophysiques.

On pourra ainsi, avec le même télescope, obtenir une gamme de résolution allant de quelques dixièmes de seconde d'arc sur des champs de 100 min d'arc carrés au centième de seconde d'arc pour des champs de quelques secondes d'arc carrés et le tout pour près de 100 % du ciel. Enfin, la correction par optique adaptative sera, dans certains cas, poussée à l'extrême (uniquement sur quelques étoiles très brillantes) afin de permettre la détection directe de planètes extrasolaires susceptibles d'abriter d'autres formes de vie.

Pour ce faire, l'ELT européen sera équipé dès sa mise en service (d'ici la fin de la décennie) d'instruments dits de « première génération ». Ces derniers sont au nombre de trois (MICAADO [14], HARMONI [15] et METIS [16]). Ils couvrent une large partie de l'espace des paramètres observationnels à la fois en termes de longueurs d'onde (du visible à l'infrarouge lointain), de résolution spectrale (jusqu'à plus de 10 000) et de champ de vue accessible. Ils seront rejoints dès le début de la prochaine décennie par deux instruments dits de « deuxième génération » (MOSAIC et ANDES) apportant leurs compléments en termes de capacités opérationnelles (en particulier en ce qui concerne le champ accessible pour MOSAIC et la précision spectroscopique pour ANDES). L'ensemble de ces instruments seront équipés de systèmes d'OA plus ou moins complexes (allant d'une OA classique à des OA tomographiques assistées par Laser, aussi appelé LTAO) pour bénéficier pleinement des capacités uniques de l'ELT :

- HARMONI combinera un système d'OA classique fonctionnant sur objets brillants (magnitude plus faible que 12/13 typiquement) et un système de LTAO [17] utilisant le miroir adaptatif de l'ELT (M4), 6 LGS (équidistribuées sur un cercle d'un peu plus d'une minute d'arc de diamètre) et une seule NGS avec une magnitude limite de 18–19 en H pour la

mesure du tilt atmosphérique et la correction des aberrations induites par les limitations de la LGS (voir [5]).

- MICADO combinera un système d'OA classique fonctionnant sur objets brillants très similaires à celui d'HARMONI (magnitude plus faible que 12/13 typiquement) et le système de MCAO MORFEO [18] utilisant 1 miroir déformable supplémentaire conjugué optiquement à environ 12 km d'altitude en complément du miroir adaptatif de l'ELT (M4), 6 LGS (équi-réparties sur un cercle de 1,5 min d'arc de diamètre) et 3 étoiles naturelles avec une magnitude limite de 18 en bande H et disponibles dans un champ de vue de près de 2,7 min d'arc de diamètre.
- METIS lui utilisera un système d'AO classique dont la particularité sera d'utiliser les photons infra-rouges (jusqu'à la bande K) pour effectuer la mesure de surface d'onde [19].

Le lecteur désireux d'en savoir plus sur l'ELT et son instrumentation est invité à lire le numéro spécial (volume 182) du journal de l'ESO « Messenger » qui résume les principales caractéristiques du télescope et de ses instruments [19].

Enfin, après quelques années d'opérations afin de bien comprendre et maîtriser la complexité du télescope et de son environnement, le dernier instrument prévu pour l'ELT sera son « Planet Finder » (PCS pour Planetary Camera and Spectrograph). Il sera installé d'ici la fin des années 2030. Cet instrument, associé à son optique adaptative extrême, sera pour l'ELT ce que SPHERE a été pour le VLT. Il permettra d'imager et de caractériser des planètes extra-solaires bien plus proches de leur étoile et bien moins massives que son prédécesseur et de tendre ainsi vers un des graals de l'astronomie moderne : l'observation directe, la collecte et l'exploitation spectroscopique de photons provenant d'exoplanètes telluriques situées dans la zone habitable de leur système planétaire et donc susceptibles d'abriter de la vie (voir [19], pages 38 à 43).

5. Quelques perspectives

Le domaine de l'OA pour l'astronomie est extrêmement actif. Ainsi, les sujets abordés depuis 20 ans, loin d'être clos, regorgent au contraire de pistes à explorer, de systèmes à imaginer et à construire, de concepts à étudier, d'expériences à conduire, d'algorithmes à proposer. Il est par nature impossible de dresser une liste exhaustive de ces activités futures, mais nous pouvons mettre en évidence certains axes majeurs qui sont, et seront dans les années à venir, les piliers des recherches à mener.

Le premier de ces axes est sans aucun doute le développement du futur télescope géant européen (ou ELT). L'instrumentation associée à ce télescope présente un nombre incalculable de défis. L'OA est au cœur de cette entreprise tant en ce qui concerne le télescope lui-même que son instrumentation avec pour objectif une première lumière pour le télescope en 2026 et la toute première image d'une planète tellurique à l'horizon 2035.

Le deuxième axe majeur repose sur le développement de nouveaux concepts pour encore améliorer les performances d'instrument de type SPHERE et préparer la prochaine génération des instruments « planet finder » sur le VLT ou l'ELT. Pour cela nous développons à l'Observatoire de Haute Provence, sur le télescope qui a vu naître l'OA pour l'astronomie, un moyen unique de validation et de test en conditions opérationnelles de concepts innovants pour l'OA. Ce moyen commun ONERA et LAM, appelé PAPHYRUS,⁷ a été installé le 7 juin 2022 sur le télescope et a produit ses tout premiers résultats quelques jours après. L'expérience unique acquise sur SPHERE pendant les 10 ans de développement de l'instrument combinée à ce moyen de test unique sera essentielle pour imaginer des concepts innovants et de nouveaux composants afin de gagner 2 à 3 ordres de grandeur en termes de contraste et de détectivité sur le système.

⁷Voir https://www.onera.fr/sites/default/files/communiqués/pdf/2022-10/CP-ONERA-CNRS-Papyrus-vf_0.pdf.

Enfin, il est important de mentionner des sujets de recherche non liés à l'astronomie mais qui se nourrissent des recherches et développements menés pour les télescopes géants. Il s'agit notamment de l'AO pour l'ophtalmologie, les télécommunications optiques, l'observation de satellites en orbite basse, l'imagerie endo-atmosphérique et la mise en forme de faisceaux laser (imagerie ou focalisation du faisceau laser). Ces activités regroupent des enjeux liés à la mesure et à la précompensation du volume de turbulence (pour corriger les effets de l'anisoplanétisme mais aussi de la scintillation), sur les problèmes d'analyse et de contrôle du front d'onde mais aussi sur le traitement des données qui sont en forte synergie avec les activités menées dans le contexte astronomique.

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Références

- [1] D. Fried, « Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures », *J. Opt. Soc. Am.* **56** (1966), p. 1372-1379.
- [2] H. W. Babcock, « The possibility of compensating astronomical seeing », *Pub. Astron. Soc. Pacific* **65** (1953), p. 229-236.
- [3] G. Rousset, J.-C. Fontanella, P. Kern, P. Gigan, F. Rigaut, P. Léna *et al.*, « First diffraction-limited astronomical images with adaptive optics », *Astron. Astrophys.* **230** (1990), p. 29-32.
- [4] G. Rousset, T. Fusco, « Optique adaptative : correction des effets de la turbulence atmosphérique sur les images astronomiques », *C. R. Phys.* **23** (2022), p. 1-52.
- [5] G. Rousset *et al.*, « NAOS, the first AO system of the VLT: on sky performance », in *Adaptive Optical System Technology II* (P. L. Wizinowich, D. Bonaccini, éd.), Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., vol. 4839, SPIE, Bellingham, WA, 2002, p. 140-149.
- [6] J.-L. Beuzit *et al.*, « SPHERE: the exoplanet imager for the very large telescope », *Astron. Astrophys.* **631** (2019), article no. A155.
- [7] T. Fusco *et al.*, « High-order adaptive optics requirements for direct detection of extrasolar planets: application to the SPHERE instrument », *Opt. Express* **14** (2006), n° 17, p. 7515-7534.
- [8] T. Fusco, J.-F. Sauvage, C. Petit, K. Dohlen, A. Costille, D. Mouillet, J.-L. Beuzit, « SPHERE-SAXO : optique adaptative extrême pour la détection de planètes extrasolaires », *Photoniques* **75** (2015), p. 34-37.
- [9] T. Fusco, C. Petit, G. Rousset, J.-M. Conan, J.-L. Beuzit, « Closed-loop experimental validation of the spatially filtered Shack-Hartmann concept », *Opt. Lett.* **30** (2005), n° 11, p. 1255-1257.
- [10] C. Petit, J.-M. Conan, C. Kulcsár, H.-F. Raynaud, T. Fusco, « First laboratory validation of vibration filtering with LQG control law for adaptive optics », *Opt. Express* **16** (2008), n° 1, p. 87-97.
- [11] J.-F. Sauvage, T. Fusco, G. Rousset, C. Petit, « Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics », *J. Opt. Soc. Am. A* **24** (2007), n° 8, p. 2334-2346.
- [12] O. Fauvarque, B. Neichel, T. Fusco, J.-F. Sauvage, O. Girault, « General formalism for Fourier-based wave front sensing: application to the pyramid wave front sensors », *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* **3** (2017), n° 1, article no. 019001.
- [13] R. Gilmozzi, J. Spyromilio, « The European extremely large telescope (E-ELT) », *The Messenger* **127** (2007), p. 11-19.
- [14] R. Davis *et al.*, « MICADO: first light imager for the E-ELT », in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI* (C. J. Evans, L. Simard, H. Takami, éd.), vol. 9908, SPIE, Edinburgh, UK, 2016.
- [15] B. Neichel, T. Fusco, J. F. Sauvage *et al.*, « The adaptive optics modes for HARMONI: from classical to laser assisted tomographic AO », in *Proceedings Adaptive Optics Systems V* (E. Marchetti, L. M. Close, J.-P. Véran, éd.), vol. 9909, SPIE, Edinburgh, UK.
- [16] B. Brandl *et al.*, « Status of the mid-infrared E-ELT imager and spectrograph METIS », in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, SPIE, 2016.
- [17] E. Diolati *et al.*, « MAORY: adaptive optics module for the E-ELT », in *Adaptive Optics Systems V* (E. Marchetti, L. M. Close, J.-P. Véran, éd.), vol. 9909, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2016.
- [18] T. Bertam *et al.*, « Single conjugate adaptive optics for METIS », in *Adaptive Optics Systems VI* (L. M. Close, L. Schreiber, D. Schmidt, éd.), vol. 10703, SPIE, Austin, USA, 2018.
- [19] M. Lyubenova, G. A. J. Hussain (éd.), *Instrumentation for ESO Extremely Large Telescope*, vol. 182, European Southern Observatory, ESO, Garching bei Munchen, Germany, 2021, <https://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.182-mar21/messenger-no182-38-43.pdf>.