L'optique adaptative à l'Onera : une technologie en perpétuelle évolution

Les travaux de l'Onera en matière d'imagerie à haute résolution angulaire ont commencé dans les années 80 dans le cadre d'applications de défense. À l'origine, l'objectif était la surveillance de l'espace, c'est-à-dire l'observation depuis le sol des satellites artificiels en orbite basse. La turbulence est limitative et il est nécessaire de développer des techniques de correction. Si au début des années 80 le principe théorique de l'optique adaptative est bien connu, la technologie nécessaire n'est pas encore mature. Dans ce contexte, l'Onera, en parallèle de travaux sur les composants d'optique adaptative (miroirs déformables, analyseurs de front d'onde, architectures informatiques…), met au point la technique de déconvolution par analyse de front d'onde, sorte d'optique adaptative numérique. Depuis, le champ d'application des études menées en optique adaptative à l'Onera s'est fortement élargi. En plus de la surveillance de l'espace, il couvre maintenant des domaines très variés allant de l'astronomie à l'imagerie de la rétine en passant par la focalisation des faisceaux laser et l'imagerie endo-atmosphérique. Pour chacune de ces applications, un balayage des travaux réalisés et des futurs développements est présenté ci-après.

Jean-Marc Conan, Thierry Fusco, Vincent Michau, Laurent Mugnier et Marie-Thérèse Velluet

Onera/Dota/HRA
Marie-Therese.Velluet@onera.fr

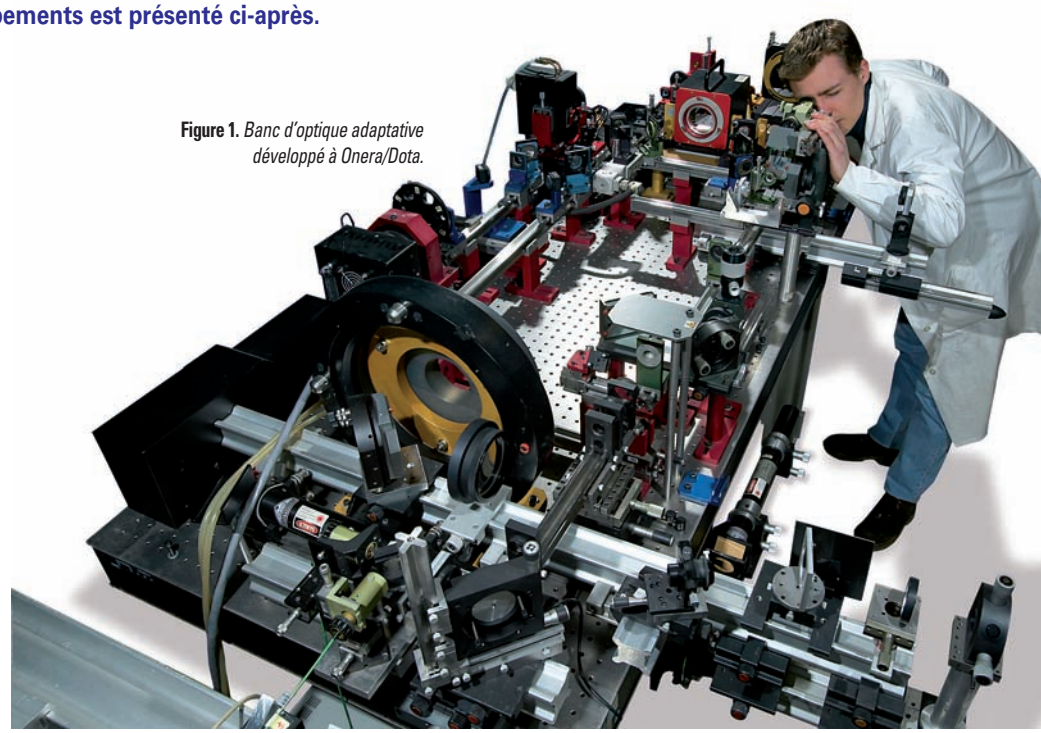


Figure 1. *Banc d'optique adaptative développé à Onera/Dota.*

Optique adaptative et surveillance de l'espace

Les techniques de traitement numérique sont limitées en rapport signal à bruit. La maîtrise de l'optique adaptative est par conséquent cruciale pour l'observation à haute résolution angulaire des satellites. En 1994, l'Onera a donc dimensionné et intégré le banc d'optique adaptative Boa (*figure 1*). Ce banc a toutes les caractéristiques nécessaires pour l'observation de satellites sur un télescope de classe 1 à 2 mètres : optimisation dans le visible, miroir déformable 10 x 10 actionneurs (Cilas), analyseur de surface d'onde visible utilisant une caméra intensifiée Dalsa, asservissement à très haute cadence (plusieurs kilohertz) utilisant un calculateur temps réel optimisé développé par la société Shaktiware. Après une validation en laboratoire, le banc est utilisé sur le télescope de 1,5 mètres de l'observatoire de Haute-Provence pour une démonstration sur des objets astronomiques, à défaut de disposer d'un télescope capable de suivre les satellites et d'accueillir un banc tel que Boa. Les deux campagnes d'observation menées en 1996 et 1997 donnent des images très impressionnantes (*voir la figure 5 de l'article Comprendre l'optique adaptative dans ce même numéro de Photoniques*). Ce sont les toutes premières images en optique adaptative au sol obtenues aux longueurs d'onde visibles, si on exclut les travaux classifiés menés aux USA. À noter que le banc Boa est encore à la pointe de la technologie grâce à des mises à jours successives au fil des ans : intégration d'un détecteur très faible bruit pour l'analyseur, mise en place d'un calculateur temps réel RTC-Linux pour une plus grande flexibilité, intégration en cours d'un miroir hauts ordres 17 x 17 actionneurs (Floralis-ALPAO). Le banc reste donc un outil essentiel pour les études amont menées en laboratoire : analyse de front d'onde faible bruit, calibration à haute précision, commande optimale (collaboration L2TI-Paris13)…

Figure 2a. *Les quatre télescopes de 8 mètres du VLT situé sur le mont Paranal (Chili).*

Optique adaptative et astronomie

L'optique adaptative trouve dans l'astronomie un immense champ d'application avec des besoins très divers en termes d'observations, demandant toujours plus d'efficacité et de précision. Ainsi, les vingt dernières années ont fait passer l'optique adaptative pour l'astronomie du stade de démonstration de principe (potentiellement intéressant mais aux performances limitées) à celui de technique à la fois éprouvée et opérationnelle, mais surtout foisonnant de nouveaux concepts pour améliorer les performances, répondre aux besoins des astronomes et tenter de s'affranchir des restrictions liées au concept d'origine, en particulier gérer les effets d'anisoplanétisme.

L'Onera est au coeur de cette évolution, en étroite collaboration avec la communauté astronomique, collaboration qui se concrétise aujourd'hui par le groupe d'intérêt scientifique Phase (Partenariat haute résolution angulaire sol espace) regroupant l'Onera et l'Observatoire de Paris. À l'origine, l'Onera a participé à la mise en œuvre du premier système d'optique adaptative pour l'astronomie, appelé COME-ON, sur le télescope de 3,6 mètres de l'European Southern Observatory (ESO) installé sur l'observatoire de la Silla au Chili. Les premières images limitées par la diffraction ont été obtenues en 1990. Cette première mondiale a ouvert la voie au développement de nombreux systèmes au cours des dix années qui ont suivi, que ce soit en Europe ou aux Etats-Unis, tous les grands télescopes de la classe des 8-10 mètres étant peu à peu équipés d'optique adaptative.

Figure 2b.
Vue 3D de Naos : d'un poids de 2,3 tonnes, il supporte la caméra d'imagerie Conica qui pèse elle-même 800 kg.

Naos, la première optique adaptative du VLT

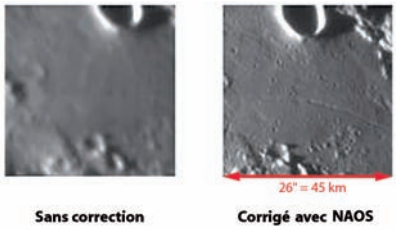
En collaboration avec les observatoires de Paris, de Grenoble et l'ESO, l'Onera a en particulier participé à la construction de Naos, l'optique adaptative pour un des télescopes de 8 mètres de l'ESO situés sur le mont Paranal au Chili (*figure 2a*).

Installé sur le site à l'automne 2000, Naos (*figure 2b*) est composé d'un miroir déformable comportant 185 points d'actionnement, permettant une déformation de quelques micromètres toutes les 2 millisecondes. Pour mesurer le front d'onde, l'utilisateur a le choix entre deux analyseurs de type Shack-Hartmann, l'un fonctionnant dans le visible (entre 0,45 et 1 microns) et l'autre dans l'infrarouge (entre 0,85 et 2,5 microns). Le tout est contrôlé par un ordinateur temps réel qui permet à la fois de piloter le miroir déformable à une cadence de 500 Hz, mais aussi de mesurer, durant l'observation, les paramètres atmosphériques et les performances du système et d'optimiser la boucle d'optique adaptative pour assurer une utilisation nominale du système quelles que soient les conditions d'observation.

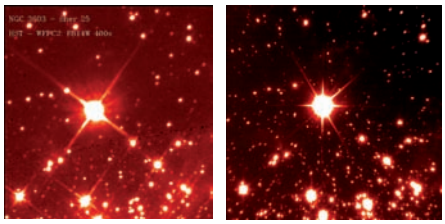
Naos permet ainsi d'obtenir une résolution de l'ordre de 50 millisecondes d'arc (ou 0,24 mradians) dans l'infrarouge proche (typiquement 1,6 à 2 microns) soit l'équivalent de la longueur d'un terrain de football sur la lune observé depuis la Terre, ce qui, à cette longueur d'onde, représente un gain d'un facteur trois vis-à-vis du télescope spatial Hubble (*figure 3*).

Au-delà de ses performances inégalées, Naos a hissé l'optique adaptative au stade d'instrument scientifique indispensable aux astronomes pour l'étude et la compréhension d'un grand nombre

Figure 3. *Exemple d'images réalisées avec Naos.*



Observation de la surface lunaire par Naos. L'analyse de front d'onde se fait sur un critère brillant. La longueur d'onde d'imagerie est de 2,4 µm. La résolution est de l'ordre de 100 mètres.



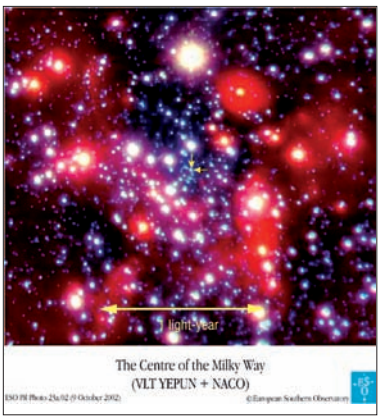
*Comparaison entre Hubble (**a**) et Naos (**b**). Malgré la longueur d'onde plus importante (2,2 µm par rapport à 1 µm), la résolution et la détectivité obtenues par Naos sont supérieures à celles du HST.*

de phénomènes physiques. Le nombre de modes d'observation (plus d'une cinquantaine) et la polyvalence de Naos permettent d'étudier des objets astronomiques allant des petits corps du système solaire jusqu'aux galaxies lointaines en passant par l'environnement proche des étoiles (disques de poussières et de gaz) et les régions de formation stellaire. Naos est à l'origine d'avancées marquantes en astronomie et astrophysique telles que l'observation de la première planète extrasolaire (*figure 4*) ou la mesure de la masse du trou noir présent au centre de notre galaxie.

Saxo, l'optique adaptative extrême de l'instrument Sphere

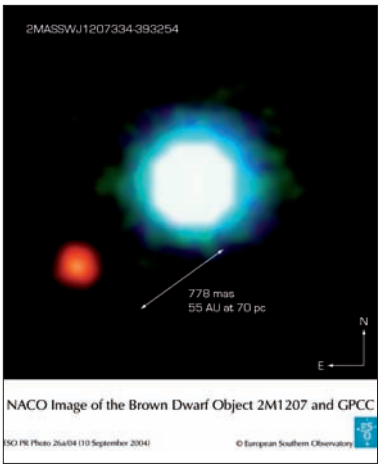
Fort de l'expérience acquise sur Naos, l'Onera est à présent en charge de la réalisation du système d'optique adaptative Saxo (*Sphere Adaptative optics for eXoplanet Observation*) du projet d'instrument Sphere (*Spectro-Polarimetric for High-contrast Exoplanet Observation*) pour l'ESO. Le consortium Sphere, mené par le laboratoire d'astrophysique de l'observatoire de Grenoble (LAOG), regroupe les instituts suivants : LAM, LESIA, LUAN et Onera pour la France, observatoire de Padoue en Italie, observatoire de Genève et UTH Zurich pour la Suisse, MPIA Heidelberg en Allemagne et Astron aux Pays-Bas.
Contrairement à Naos, ce système est dédié à une application bien particulière : l'imagerie à haute dynamique, c'est-à-dire l'observation d'objets très faibles proches d'une étoile brillante,

Figure 4. *Exemple de résultats astrophysiques marquants obtenus grâce à Naos.*



© R. Genzel

a. *Observation du centre galactique : la mesure du mouvement des étoiles proches donne accès à la masse du trou noir central (3,6 millions de masse solaire).*



© Crédit G. Chauvin

b. *Observation de la première planète extrasolaire (point rouge dans l'image) orbitant autour d'une naine brune. La planète a une masse cinq fois supérieure à celle de Jupiter.*

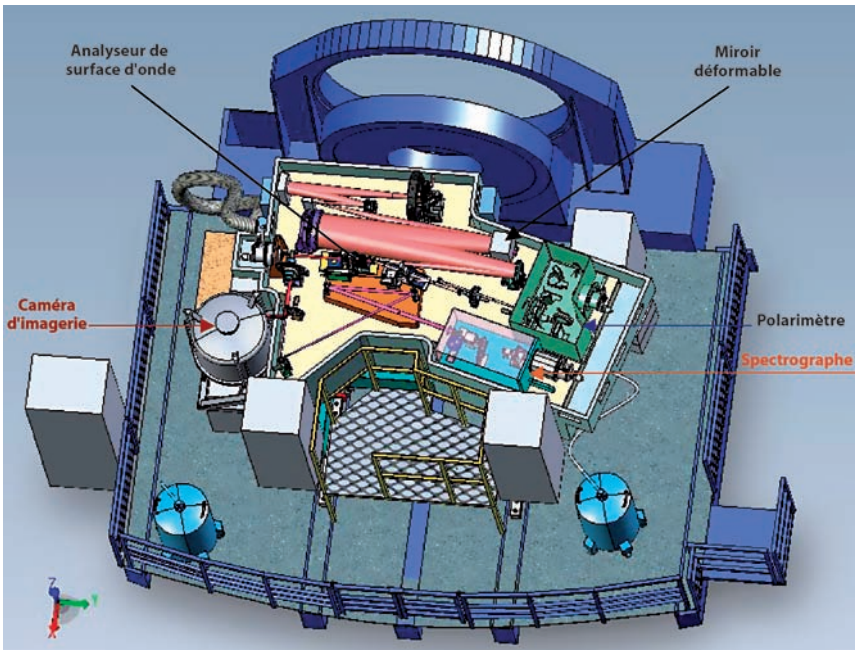


Figure 5. *Sphere au foyer Nasmyth du VLT. L'optique adaptative permet de corriger le front d'onde pour trois instruments scientifiques : une caméra infrarouge (bandes Y à K), un spectrographe à intégrale de champ (bandes I-J-H) et un polarimètre imageur (bandes R-Y).*

et idéalement des planètes extrasolaires. Ce type d'observation, il s'agit de détecter quelques photons venant d'une planète parmi les millions venant de son étoile hôte, suppose de gagner un ordre de grandeur en performance vis-à-vis des systèmes existants. Il faut donc pousser l'optique adaptative dans ses ultimes retranchements à la fois sur le plan conceptuel avec l'optimisation des processus de mesure de front d'onde, de commande et de calibration et sur le plan technologique avec l'utilisation :

- d'un miroir à très grand nombre de degrés de liberté réalisé par la société Cilas : l'objectif est de passer de 185 actionneurs pour le miroir de Naos à près de 1 400 pour celui de Saxo ;
- de détecteurs très rapides - l'objectif est de passer de 500 Hz pour Naos à plus de 1 200 Hz pour Saxo - et à faible bruit pour l'analyse de front d'onde ;
- de calculateurs temps réel permettant de contrôler l'ensemble du système avec des temps de latence inférieurs à 100 ms.

On parle alors d'optique adaptative « extrême ». Il faut, de plus, intégrer dans le dimensionnement et la réalisation de l'optique adaptative les spécificités qu'impose le couplage avec des coronographes (élimination des photons venant de l'étoile au profit de ceux de l'objet d'intérêt) et des systèmes d'imagerie, de spectroscopie et de polarimétrie avancés.

L'instrument Sphere (*figure 5*) et son système d'optique adaptative Saxo sont actuellement en cours de dimensionnement final. L'intégration et les tests de l'ensemble du système sont prévus entre 2009 et 2010. L'instrument devrait voir sa première lumière sur un des télescopes de 8 mètres de l'ESO au mont Paranal (Chili) à la fin 2010 et détecter ses premières planètes extrasolaires en 2011.

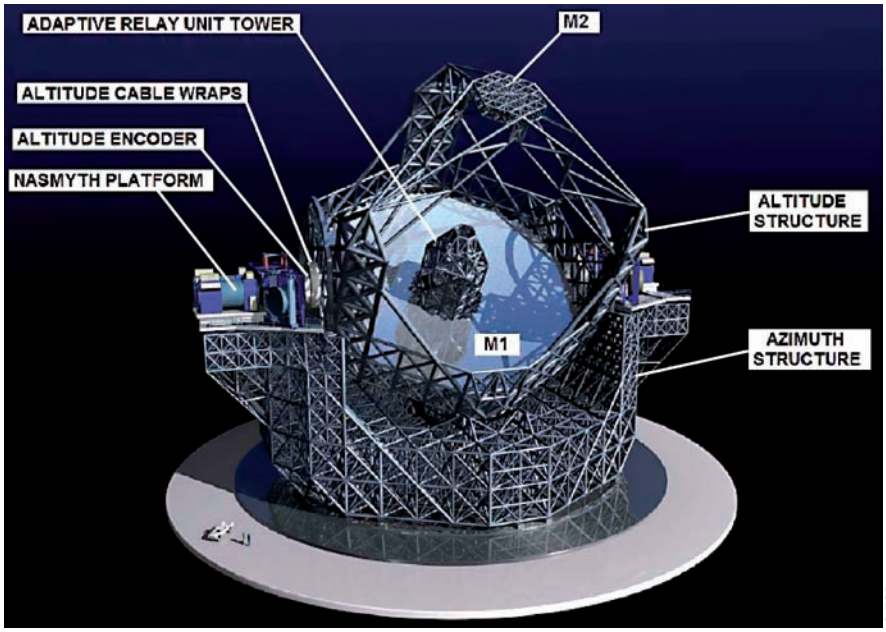


Figure 6. *Représentation 3D du futur télescope géant européen (E-ELT) de 42 mètres de diamètre. Le miroir primaire sera composé d'environ 900 segments hexagonaux de l'ordre de 1,5 mètre chacun. Les optiques de relais du télescope comporteront des miroirs adaptatifs (miroir de 2,4 mètres avec plus de 5 000 actionneurs et un miroir de basculement de plus de 2 mètres) pour corriger les aberrations du télescope lui-même et une partie de la turbulence.*

■ Optique adaptative pour les ELTs

À plus longue échéance, se profile le futur télescope géant européen (*European Extremely Large Telescope* ou E-ELT *figure 6*), d'un diamètre de 42 mètres et qui devrait observer ses tout premiers objets d'ici une dizaine d'années. Le défi que représentent la conception, la construction et l'opération d'un télescope de 42 mètres est considérable. L'extrapolation de solutions techniques existantes permettant d'obtenir une excellente qualité d'image dans un champ de grande taille, pose de nombreux problèmes. Deux aspects très importants du développement de l'E-ELT sont le contrôle d'une

optique de haute précision à l'échelle du télescope, ainsi que la conception des instruments qui doivent permettre aux astronomes d'atteindre les objectifs scientifiques ambitieux de l'E-ELT. Une fois encore, l'optique adaptative est au coeur de cette entreprise à la fois pour le télescope lui-même mais également pour l'instrumentation associée. Le télescope sera adaptatif et intègrera un premier étage de correction avec en particulier la mise en oeuvre d'un miroir déformable de 2,4 mètres de diamètre comportant plus de 5500 actionneurs. L'instrumentation associée intègrera, pour la majeure partie des systèmes envisagés, un système d'optique adaptative en complément de celui fourni par le télescope. Ces systèmes seront de plus en plus complexes et de plus en plus exigeants en termes de qualité de correction et de champ et demanderont des composants toujours plus performants alliés à des concepts toujours plus innovants.

Dans ce cadre, l'Onera participe à la fois aux études concernant l'optique adaptative du télescope, avec en particulier une implication dans la définition du miroir de 2,4 mètres de diamètre, et à celles concernant les futurs instruments, avec notamment une implication forte dans le dimensionnement préliminaire de systèmes d'optique adaptative à grand champ dits systèmes d'optique adaptative multiconjuguée et multi-objets. Pour être efficaces, ces systèmes doivent s'affranchir du phénomène d'anisoplanétisme lié à la distribution de la turbulence en altitude (typiquement sur les 15 premiers kilomètres de l'atmosphère). Les aberrations sont créées par ce volume de turbulence mais corrigées dans un seul plan, celui du miroir déformable. Cela n'autorise une correction efficace que proche de la direction de mesure de front d'onde, réduisant ainsi le champ d'intérêt et la couverture de ciel (portion du ciel observable) des systèmes d'optique adaptative (*figure 7*). L'augmentation du champ de correction sera possible grâce à l'utilisation combinée de :

- plusieurs étoiles guides artificielles (étoiles laser) pour permettre une mesure de front d'onde multidirectionnelle et ainsi une reconstruction du volume de turbulence par un processus tomographique,
- plusieurs miroirs déformables pour permettre une correction dans un grand champ de vue (de l'ordre de plusieurs minutes d'arcs).

Il y a de nombreux problèmes à résoudre, tant technologiques que conceptuels, avant d'arriver à la phase de réalisation de ce type d'instrument sur l'E-ELT. Soutenues par l'ESO et la Communauté européenne, des phases d'études préliminaires ont été lancées récemment. Dans chaque cas, l'Onera est au coeur de la définition et du dimensionnement préliminaire de l'optique adaptative, avec pour ambition de permettre la mise en place de tels sys-

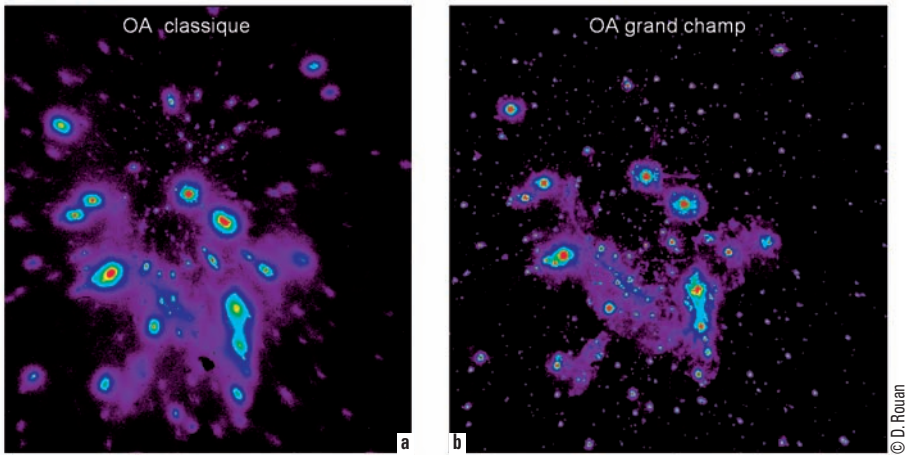


Figure 7. *Effet de l'anisoplanétisme pour un système d'optique adaptative classique (a) et apport potentiel d'un système multiconjugué (b) grâce à l'analyse de front d'onde multidirectionnelle et la correction du volume de turbulence par plusieurs miroirs déformables conjugués optiquement à différentes altitudes.*

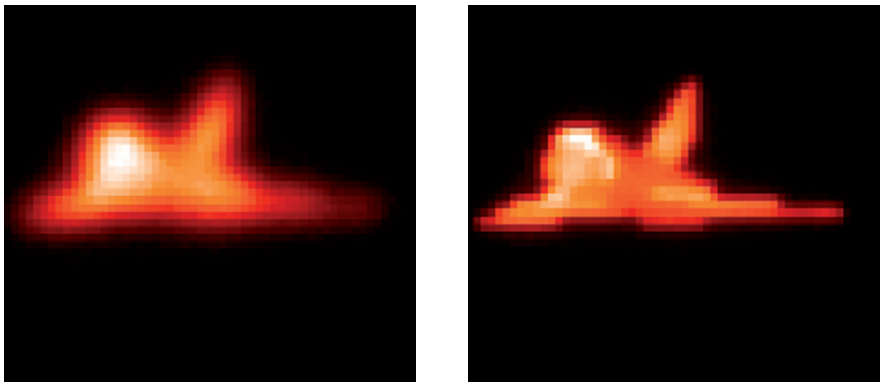


Figure 8. *Performances attendues avec un système d'optique adaptative de type Inca (modélisation numérique) : à gauche, image non corrigée ; à droite, image après correction par le banc INCA.*

tèmes sur l'E-ELT avant la fin de la prochaine décennie. Les compétences multidisciplinaires de l'Onera (sources laser, analyse de grandes structures, détecteurs infrarouge, traitement de données et calcul parallèle) sont fédérées, au sein du projet Cassiopée pour relever ces multiples défis.

Ainsi, l'optique adaptative (en particulier le projet EAGLE ELT - *Adaptive optics for GaLaxies Evolution* -) alliée au très grand diamètre du télescope devrait permettre d'observer, par exemple, la formation et l'évolution des toutes premières galaxies et d'effectuer des percées décisives dans notre connaissance de l'univers. Le consortium EAGLE, mené par l'observatoire d'astrophysique de Marseille (LAM), regroupe le LESIA, le GEPI et l'Onera pour la France ainsi que l'université de Durham et l'UK-ATC d'Edimbourg pour le Royaume-Uni

Optique adaptative et observation endo-atmosphérique

Depuis 2000, l'Onera étudie pour la DGA (direction générale de l'armement) l'application de l'optique adaptative à l'imagerie endo-atmosphérique. C'est une application plus délicate de l'op-

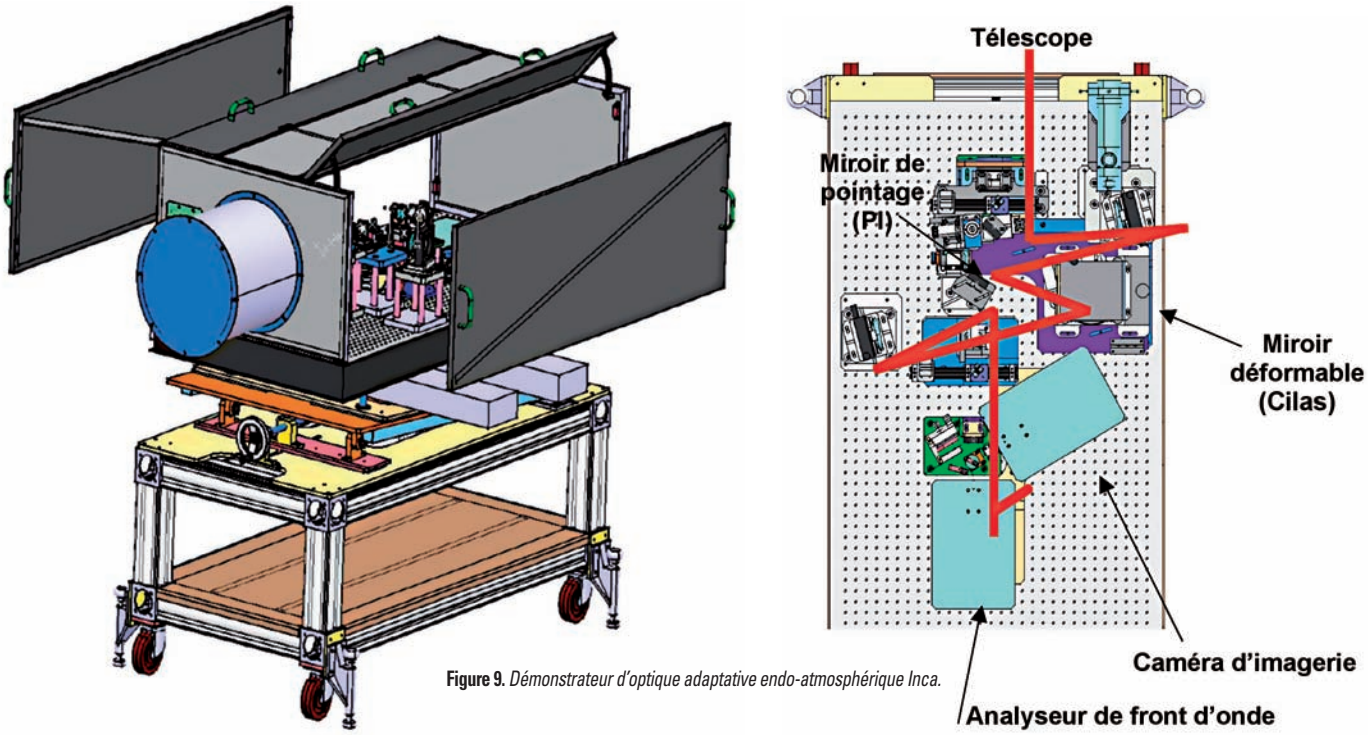


Figure 9. *Démonstrateur d'optique adaptative endo-atmosphérique Inca.*

tique adaptative car les conditions de turbulence proche du sol sont plus sévères, notamment en ce qui concerne les effets d'anisoplanétisme et de scintillation. L'analyse de différents scénarii permet de montrer l'apport potentiel de cette technique pour une observation, depuis le sol ou depuis un navire, d'objets volants à quelques centaines ou milliers de mètres d'altitude et des portées de 10 à 20 kilomètres.

À la fois pour limiter les effets de la turbulence et pour permettre une observation passive jour/nuit, la longueur d'onde choisie est infrarouge, autour de 4 microns. Les outils développés à l'Onera permettent de simuler la propagation à travers la turbulence et la correction par l'optique adaptative. Les performances attendues sont très prometteuses (*figure 8*). L'application de l'optique adaptative dans ce contexte est à notre connaissance un domaine entièrement vierge. Il est donc important d'obtenir une démonstration expérimentale. L'Onera développe à cet effet le banc Inca (*figure 9*). L'objectif est d'effectuer des observations terrain sur une cible infrarouge coopératrice avec un télescope de 40 cm de diamètre. La distance télescope-cible est de l'ordre de 10 km ; la cible est située sur une montagne à une altitude relative de 800 mètres par rapport au point d'observation. Le banc d'optique adaptative est dimensionné en conséquence : analyseur de surface d'onde infrarouge présentant 5 x 5 sous-pupilles, cadence d'asservissement de 500 Hz, détecteurs et cryogénie infrarouge développés par Sofradir, calculateur temps réel de nouvelle génération sur un PC-Linux (Shaktiware). Le banc est actuellement intégré. Les essais en laboratoire se poursuivront jusqu'au printemps 2008. Les campagnes terrain auront lieu autour de l'été 2008.

Les effets d'anisoplanétisme sont, bien sûr, une des limitations principales de l'optique adaptative dans le domaine de l'imagerie endo-atmosphérique comme en témoigne la *figure 10*. Le concept d'optique adaptative multiconjuguée (OAMC) développé initialement pour l'astronomie est très prometteur pour les applications tactiques. La technique est cependant très jeune et très complexe. L'Onera est un acteur majeur des nouveaux développements en OAMC et s'appuie sur les synergies entre le civil et la défense. On peut citer comme thèmes de recherche actuels : les stratégies d'analyse de front d'onde multidirectionnelle, la commande optimale (collaboration L2TI-Paris13), les démonstrations expérimentales. Dans le cadre d'une action de recherche DGA, l'Onera vient d'intégrer un banc de validation en laboratoire appelé Homer (*Hartmann Oriented Multiconjugate Experimental Resource*). À l'image de Boa pour l'optique adaptative classique, ce banc sera un outil unique pour les études amont en OAMC. Parallèlement, est étudiée l'application de l'OAMC aux conditions de turbulence sévères qui caractérisent l'observation endo-atmosphérique.

Optique adaptative et focalisation de faisceaux laser

La turbulence atmosphérique perturbe également la propagation des faisceaux laser. Elle peut provoquer des déplacements transverses et un élargissement de la répartition transverse du faisceau ainsi que des modulations du flux équivalentes au phénomène de scintillation. Ces phénomènes limitent l'efficacité

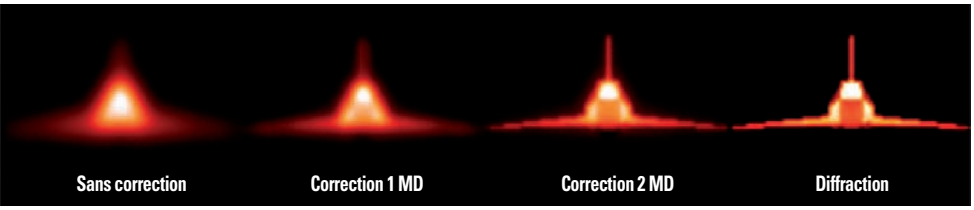


Figure 10. *Performances attendues avec un système d'optique adaptative de type Inca en version classique (1 MD) et multiconjuguée (2MD) (modélisation numérique) comparées à la limite de diffraction de l'instrument.*

des systèmes militaires d'éblouissement ou d'endommagement en réduisant leur capacité de focalisation. Dans le cas des systèmes de télécommunication laser en espace libre, les déplacements et modulations locales du profil transverse du faisceau peuvent se traduire par des annulations temporaires de la transmission optique, ce qui, *in fine*, conduit à une réduction de la bande passante effective du système.
L'Onera a développé le code Pilot pour modéliser la propagation optique à travers la turbulence dans le cas de l'imagerie endo-atmosphérique où les perturbations sont particulièrement fortes. En s'appuyant sur cet outil, l'Onera a caractérisé les effets de la turbulence atmosphérique sur le faisceau laser de Lola, le projet mené par Astrium pour la DGA qui a permis, pour la première fois au monde, une liaison optique à haut débit entre un avion en vol et le satellite Artémis.
Il est possible d'aller plus loin avec l'optique adaptative : une mise en forme ou précompensation du faisceau laser permet de limiter les perturbations d'intensité dans le plan de réception comme on peut le voir sur la *figure 11*.
Les deux principales limitations de la précompensation sont :
- la taille limitée de la pupille d'émission : dans son principe, la précompensation doit être réalisée dans tout le plan d'émission ;
- la nécessité de contrôler la phase et l'amplitude de l'onde émise.

À ces deux limitations fondamentales s'ajoute le problème de la mesure de front d'onde dans le cas où l'amplitude de l'onde est fortement modulée du fait de la scintillation.
Différentes approches ont été proposées pour appréhender l'ensemble de ces problèmes. Lorsque les effets de la turbulence atmosphérique restent faibles, la mesure des perturbations avec un analyseur pupillaire comme le Shack-Hartmann et le contrôle de la phase de l'onde émise avec un seul miroir déformable est suffisamment efficace. L'Onera a développé un ensemble de modèles permettant d'évaluer la qualité de focalisation par l'optique adaptative pour des systèmes militaires reposant sur cette architecture.

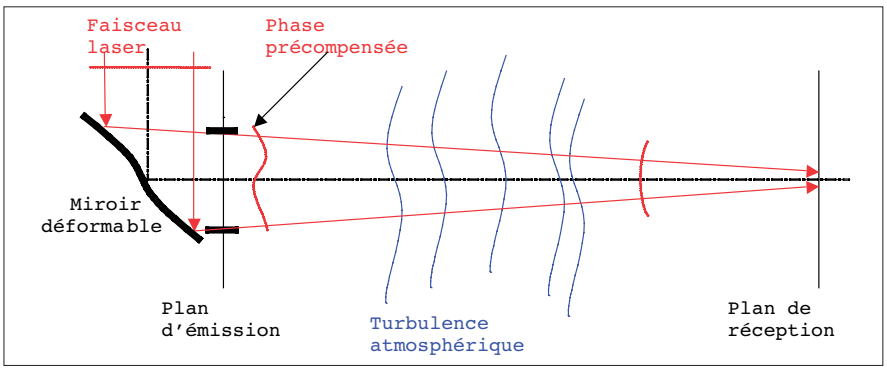


Figure 11. *Principe de la précompensation de faisceau laser.*

Dans le domaine des télécommunications, la liaison optique en espace libre, associant très haut débit et coûts d'infrastructure minimisés, connaît un développement croissant. Dans ce cas, les effets de la turbulence atmosphérique limitent actuellement la portée de tels systèmes. Ces effets étant ici sévères, l'architecture précédente n'est plus adaptée. En collaboration avec la société Shaktiware, l'Onera étudie aujourd'hui de nouvelles solutions pour appliquer la précompensation par optique adaptive à une liaison horizontale optique. L'utilisation de plusieurs miroirs déformables comme dans le cas de l'optique adaptative multiconjuguée est envisagée. L'étape suivante est la mise en œuvre de l'optique adaptative pour les liaisons entre la Terre et l'espace, c'est-à-dire avec les satellites de communications, les sondes spatiales, en particulier pour l'exploration martienne.

Optique adaptative et imagerie rétinienne

Dans un futur proche, la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge) devrait toucher une personne sur deux. Des équipes de recherche tentent de développer des médicaments pour arrêter ou ralentir cette dégénérescence, mais actuellement il est impossible de voir rapidement quels sont les effets des médicaments. Grâce à l'optique adaptative qui permettra l'examen in *vivo* du tissu rétinien et la visualisation des microstructures de la rétine, les médecins pourront intervenir sur des patients ayant encore une vision correcte, choisir le traitement le plus approprié et en suivre précisément l'action.
Dans ce cadre, l'Onera, avec l'Observatoire de Paris, pionnier dans ce domaine, participe au projet pré-industriel Inoveo (mené par Imagine Optic) sélectionné par le Réseau national des technologies pour la santé (RNTS), à la fois sur la commande de l'optique adaptative et sur la restauration d'images.
Un accord est en cours de signature pour regrouper les travaux de l'Onera, de l'Observatoire de Paris, de l'hôpital des XV-XX et de l'Inserm au sein de l'Institut de la vision nouvellement créé.

Optique adaptative et restauration d'images

L'exploitation optimale de données fournies par un système optique passe par son couplage à un traitement d'image adapté. Dans le cadre de l'optique adaptative, il s'agit de rehausser les hautes fréquences spatiales atténuées du fait de la correction partielle du front d'onde. Dans ce cadre, un des principaux défis à relever concerne l'estimation fine de la réponse globale du système lors de son fonctionnement.
Une méthode de restauration appelée Mistral (*Myopic Iterative STep-preserving Restoration ALgorithm*), a été développée à l'Onera. Elle combine :
- les contraintes exprimant les informations a priori sur l'objet observé,
- une modélisation fine de la formation de l'image et du bruit,

-la prise en compte de la connaissance partielle de la réponse du système.
Elle a été appliquée avec succès à la fois à des images de type défense et astronomie. Dans le cadre de l'imagerie de la rétine, on cherche à restituer un objet tridimensionnel contrairement à l'astronomie où l'on cherche à concentrer la lumière pour obtenir des détails en piqué sur une seule image. Ainsi, il faut avant tout démêler les différents plans images enregistrés à différentes profondeurs dans la rétine afin de parvenir à une tomographie numérique (*figure 12*). Il s'agit ici de généraliser les travaux effectués dans le cadre de l'algorithme Mistral à l'imagerie 3D.

Références :

www.onera.fr/conferences/naos/

www.lesia.obspm.fr/astro/optada/OEIL/pages/accueil.htm

www.onera.fr/lumiere (onglet IDENTIFIER)

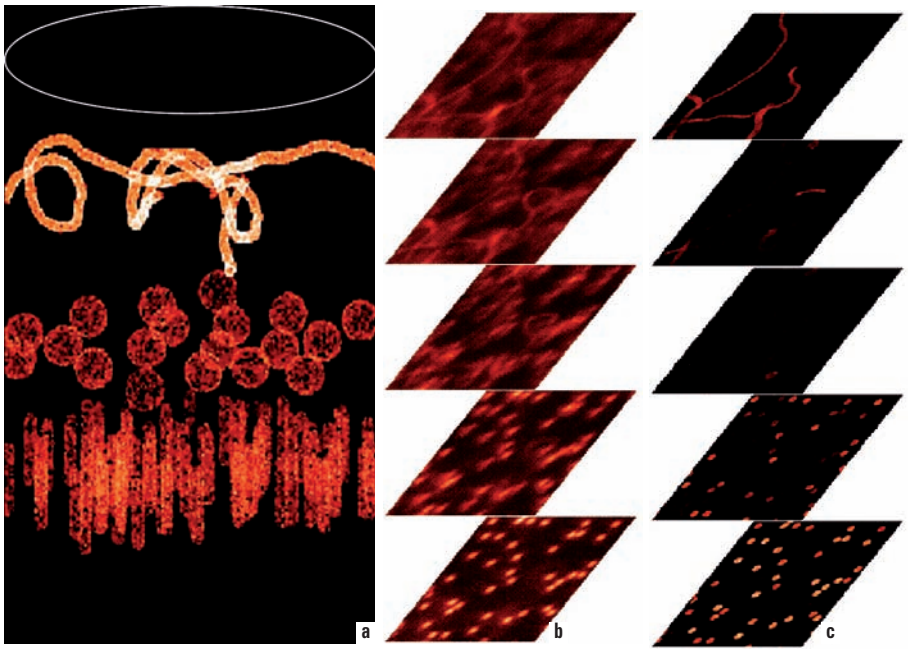


Figure 12. a. *Représentation 3D schématique de la rétine, des photorécepteurs au fond de l'oeil (bas) aux vaisseaux sanguins (haut) en passant par les cellules ganglionnaires.* **b.** *Après acquisition, les images corrigées par optique adaptative.* **c.** *Après déconvolution, le résultat final exploitable par les médecins.*