



## MCAO for very large telescopes/OAMC pour les très grands télescopes

## Foreword

The great success of classical Adaptive Optics (AO) on 10 meter class astronomical telescopes, as demonstrated by the first direct observation of an extra-solar planet, recently triggered the search for new AO concepts, particularly for wide field observations. These new approaches are gathered under the generic term of Multi-Conjugate Adaptive Optics (MCAO). These new approaches completely reinvent AO and should bring essential tools to observation astronomy. It should then serve the study of the physics of astronomical objects such as high red-shift galaxies, star forming regions and, closer to us, the sun itself.

The angular resolution of ground based astronomical telescopes is limited, at optical wavelength, by atmospheric turbulence effects. AO allows us to measure these turbulent perturbations in a given observation direction, and to correct for them, in real time, with a deformable mirror, generally image of the instrument pupil. The resolution of AO corrected telescopes can then reach the diffraction limit, the ratio of the wavelength over telescope diameter. For a 10 meter class telescope the resolution limit is of the order of 50 milli-arcsecond in the near infra-red (at 2 microns). Without correction, the resolution imposed by turbulence (seeing) is smaller than 1 arcsecond at a good astronomical site.

Impressive developments have been performed in the field of AO in the past twenty years. European teams have played a major role in this work, especially with the development of systems for the European Southern Observatory (ESO) telescopes: COME-ON, first AO for astronomy, followed by NAOS and MACAO on the VLT. Since these very successful results AO has become a key element for the new astronomical instruments of very large telescopes and future extremely large telescopes (ELT, 30 to 50 meter class).

The initial form of AO however has intrinsic limitations. Indeed, turbulence being distributed in a volume corresponding to the first twenty kilometers, perturbations evolve in the field of view (anisoplanatism) and can not be corrected by a unique deformable mirror. Moreover, wave-front sensing is performed on a unique guide star. This source has therefore to be close to the object of interest to limit anisoplanatism, while still being sufficiently bright to obtain the required precision. There are two consequences: first, classical AO provides a corrected field limited to the isoplanatic angle around the guide star (a few arcseconds in the visible, and a few tens in the near infra-red); second, the lack of bright guide stars near scientific objects severely limits the regions of the sky than can be observed with AO. For 10 meter class telescopes the sky coverage is only a few percent in the near infra-red. The use of artificial guide stars generated by lasers has been proposed to improve the sky coverage, but this solution has its own difficulties.

MCAO aims at partially over-coming anisoplanatism effects by the use of two main ideas (Esposito [1]): the simultaneous use of several guide stars for wave-front sensing, and the potential use of several mirrors imaged at different altitudes to compensate for the turbulent volume. In the past five years, research has been very active on this subject, and AO has entered a new era with many variations around the MCAO theme. For a 10 meter class telescope, in the near infra-red, it has been shown that diffraction limited images can be obtained in a few arcminute field, provided that bright enough guide stars can be found. Concerning correction, 2 or 3 mirrors are sufficient, hence a still reasonable system complexity. Improving further the MCAO sky coverage requires the use of laser guide stars (Rigaut and d'Orgeville [2]).

An alternative consists in analyzing a large number of stars in the field, however faint, and in correcting for the mean wave-front with a unique deformable mirror located in a pupil plane. This corresponds to the so-called Ground Layer AO (GLAO) (Hubin et al. [3]). The correction corresponds to the contributions common to all points in the considered field of view, hence, essentially, the turbulence close to ground. This technique does not provide very high image quality, but since most of the turbulence is generally concentrated near the ground, a significant improvement is expected in terms of angular resolution on few arcminute fields, with a good sky coverage. Such a performance is very attractive for extra-galactic astronomy and cosmology.

The observation of high red-shift galaxies ( $z = 3$  on the VLT, and  $z = 8-12$  on ELTs) also corresponds to very specific requirements: simultaneous observation of about ten small (around 1 arcsecond) and very faint objects distributed over a very large field of view (10 to 20 arcminutes). The concept of Multi-Object AO (MOAO) (Gendron et al. [4]) should satisfy such

needs: multi-analysis on the guide stars available in the field, and correction by several mirrors, each mirror being specifically attributed to a tiny portion of the field corresponding to one of the galaxies. This concept should allow a rather good sky coverage on the VLT.

The use of multi guide star wave-front sensing, a common characteristics of all MCAO concepts, should globally allow us to improve sky-coverage. Different multi guide star wave-front sensing approaches (Fusco et al. [5]) have been proposed to make the best of the available photons: wave-front sensing on each individual guide stars (Star Oriented), or summation, in an altitude conjugate plane, of the flux coming from several guide stars (Layer Oriented)... The performance optimization in MCAO also requires the development of new innovative servo-loop control approaches (Petit et al. [6]). The mirror commands have to be deduced from an explicit reconstruction of the turbulent volume for an optimal correction in the field of view of interest, accounting for spatial and temporal characteristics of the turbulent wavefronts.

MCAO therefore opens brand-new perspectives in high resolution astronomy. Numerous astronomical instruments are already under study, among others one can cite:

- second generation VLT instruments based on GLAO (GALACSI/MUSE, GRAAL/HAWK-I) (Hubin et al. [3]), or based on MOAO (FALCON) (Gendron et al. [4]),
- an MCAO instrument with laser guide stars for the Gemini-South telescope (Rigaut and d’Orgeville [2]),
- a Layer Oriented MCAO instrument (LINC-NIRVANA), for the Large-Binocular-Telescope (Gaessler et al. [7]).

The preparation of these projects has required an huge effort in validation and modeling. Numerical simulations (Le Louarn et al. [8]) are a crucial tool for the study and comparison of the various concepts; it is also necessary to guide technical choices when designing these very complex systems. The numerical tools are now available for 10 meter class telescopes. An experimental validation, in the laboratory and then on the VLT, is currently in progress with the MCAO demonstrator MAD (Marchetti et al. [9]) developed at ESO.

A new era of ground-based astronomy is now about to start, with the future construction of ELTs, which is closely related to associated AO developments. The design of MCAO for ELTs (Ragazzoni et al. [10]) is a difficult subject. In any case, technological limitations and turbulence characteristics at large spatial scales forbid a simple scaling of existing systems. The numerical simulation of such instruments is also a major challenge (Le Louarn et al. [8]).

The study of the physics of the solar atmosphere also requires the observation of small spatial scales, around one tenth of an arcsecond, on few arcminute fields. The international solar community is then very active in AO. The solar spatial structure (granulation) can be used for wave-front sensing, it is therefore an attractive object for multi-direction wave-front sensing and MCAO (von der Lühe et al. [11]). The first MCAO corrected solar images have been recorded very recently. Note that current solar telescopes have diameters around one meter, but a 4 meter telescope project (ATST) is now under study. AO will play a major role in the design of this future instrument.

The *Office National d’Études et de Recherches Aérospatiales*, in collaboration with the European institutes part of the Research and Training Network on ‘OA for ELTs’ (supported by the European Union), has organized, with the partnership of the French *Académie des Sciences*, a *Journée Scientifique ONERA* on MCAO. This present volume gathers the communications made by the invited speakers. The major European researchers active in the field have contributed, and the results presented are on the most significant subjects. This volume gives an up-to-date status which should be valuable for the AO community. The next step, and current hot topic, is, of course, the future ELTs that are planned for 2015.

## Avant-propos

*Le succès de l’optique adaptative classique (OA) sur les télescopes astronomiques de classe 10 mètres, notamment avec l’observation directe de la première planète extrasolaire, a entraîné l’émergence récente de nouveaux concepts d’OA, notamment pour les observations à grand champ. Ces nouvelles approches sont rassemblées sous le terme générique d’Optique Adaptative Multi-Conjuguée (OAMC). Ces techniques révolutionnent le domaine de l’OA. Elles devraient apporter à l’astronomie observationnelle des outils aux performances inégalées qui serviront l’étude de la physique des objets astronomiques comme par exemple les galaxies lointaines, les régions de formation d’étoiles et plus proche de nous le soleil lui-même.*

*La résolution angulaire des télescopes astronomiques au sol est limitée, aux longueurs d’onde optique, par les effets de la turbulence atmosphérique. L’OA permet d’analyser ces perturbations turbulentes dans une direction du champ de vue et de les corriger en temps réel par un miroir déformable, généralement conjugué de la pupille de l’instrument. La résolution des télescopes équipés d’OA peut donc atteindre la limite théorique imposée par les lois de la diffraction, rapport de la longueur d’onde par le diamètre du télescope. Pour un télescope de la classe 10 mètres, cette résolution limite est de l’ordre de 50 milli-*

secondes d'arc dans le proche infra-rouge (à 2 microns). En l'absence de correction la résolution imposée par la turbulence (seeing), est inférieure à la seconde d'arc dans un bon site astronomique.

L'OA a fait l'objet de développements spectaculaires durant les vingt dernières années. Les équipes européennes y ont joué un rôle majeur, notamment à travers la réalisation des systèmes installés sur les télescopes de l'European Southern Observatory (ESO) : COME-ON, première OA pour l'astronomie, suivi de NAOS et MACAO sur le Very Large Telescope (VLT). L'OA est donc devenue un élément clef pour les nouveaux instruments astronomiques sur les grands télescopes et les futurs extrêmement grands télescopes (ELT, classe 30 à 50 mètres).

L'OA dans sa forme initiale présente cependant des limitations intrinsèques. En effet, la turbulence étant distribuée dans le volume compris dans les vingt premiers kilomètres, les perturbations sont variables dans le champ de vue (anisoplanétisme) et ne peuvent être pleinement corrigées par un unique miroir déformable. D'autre part, l'analyse de front d'onde est effectuée sur une unique étoile guide. Cette source doit donc être proche de l'objet d'intérêt pour limiter les effets d'anisoplanétisme, tout en étant suffisamment brillante pour obtenir la précision souhaitée. Les conséquences sont doubles : l'OA classique donne un champ corrigé limité au champ isoplanétique autour de l'étoile guide (quelques secondes d'arc dans le visible, et quelques dizaines dans le proche infra-rouge) ; la difficulté à trouver une étoile guide lumineuse dans le voisinage de l'objet scientifique limite sévèrement les régions du ciel observables. Sur un télescope de classe 10 m, la couverture de ciel n'est que de quelques pourcents en proche infra-rouge. L'utilisation d'étoiles artificielles créées par laser a été proposée pour améliorer la couverture, mais cette solution n'est pas sans difficulté.

L'OAMC permet de repousser la limitation de l'anisoplanétisme en utilisant deux nouvelles idées maîtresses (Esposito [1]) : l'utilisation simultanée de plusieurs étoiles guides du champ pour l'analyse de front d'onde, et l'utilisation potentielle de plusieurs miroirs déformables conjugués à différentes altitudes pour corriger le volume turbulent. Durant les cinq dernières années, la recherche a été très active dans ce domaine avec l'apparition de nombreuses variations autour du thème de l'OAMC.

Pour un télescope de classe 10 mètres dans le proche infra-rouge, il est possible d'obtenir quelques minutes d'arc de champ corrigé à la limite de diffraction sous réserve de trouver quelques étoiles guides lumineuses. Quant à la correction, 2 à 3 miroirs déformables suffisent, la complexité d'un tel système d'OAMC reste donc raisonnable. Pour accroître la couverture de ciel le recours à des étoiles laser est aussi envisageable en OAMC (Rigaut et d'Orgeville [2]).

Une alternative consiste à analyser un grand nombre d'étoiles du champ, même faibles, et à corriger le front d'onde moyen par un unique miroir déformable situé dans un plan pupille. C'est le principe dit de Ground Layer AO (GLAO pour correction de la couche-sol) (Hubin et al. [3]). On corrige essentiellement les perturbations communes aux différents points du champ, c'est-à-dire la turbulence proche du sol. Cette technique ne permet pas d'atteindre de très bonnes qualités d'image, mais la turbulence au sol étant généralement forte, un gain significatif en résolution est attendu sur des champs de plusieurs minutes d'arc avec une bonne couverture de ciel. De telles performances sont très intéressantes pour l'astronomie extra-galactique et la cosmologie.

L'observation du ciel profond (galaxies à  $z = 3$  sur le VLT, et  $z = 8-12$  sur les ELT) constitue aussi un besoin spécifique : observation simultanée d'une dizaine d'objets très faiblement lumineux et de petites dimensions (environ 1 seconde d'arc) répartis dans un très grand champ (10 à 20 minutes d'arc). Le concept d'OA Multi-Objet (MOAO) (Gendron et al. [4]) a été proposé dans ce cadre : multi-analyse sur les étoiles présentes dans le champ, et correction par plusieurs miroirs, chacun étant dédié à une portion de champ spécifique correspondant à une des galaxies. Le concept devrait permettre une assez bonne couverture de ciel sur le VLT.

L'utilisation de la multi-analyse, commune à ces différents concepts d'OAMC, permet globalement d'accroître la couverture de ciel. Différentes approches de multi-analyse (Fusco et al. [5]) ont cependant été proposées pour tirer le meilleur parti des photons disponibles : analyse par étoile (Star Oriented), ou sommation, dans des plans conjugués en altitude, du flux issu des étoiles guides (Layer Oriented)... L'optimisation des performances en OAMC nécessite aussi de développer des approches novatrices pour l'asservissement du système (Petit et al. [6]). La commande des miroirs déformables doit s'appuyer sur une reconstruction explicite du volume turbulent pour une correction optimale dans le champ de vue d'intérêt et une prise en compte fine des caractéristiques spatiales et temporelles des fronts d'onde turbulents.

L'OAMC ouvre donc des perspectives uniques pour l'astronomie à haute résolution. De nombreux projets d'instruments sont déjà à l'étude, on peut citer entre autres :

- des instruments de deuxième génération pour le VLT en GLAO (GALACSI/MUSE, GRAAL/HAWK-1) (Hubin et al. [3]), en MOAO (FALCON) (Gendron et al. [4]),
- un instrument de MCAO avec étoiles laser pour le télescope Gemini-Sud (Rigaut et d'Orgeville [2]),
- un instrument OAMC Layer Oriented (LINC-NIRVANA), pour le Large-Binocular-Telescope (Gaessler et al. [7]).

Pour préparer ces projets un important effort de validation et de modélisation a été effectué. Les simulations numériques (Le Louarn et al. [8]) s'avèrent être une approche indispensable pour l'étude des concepts mais aussi pour les choix de dimensionnement des systèmes. Ces outils numériques sont bien maîtrisés pour les télescopes de classe 10 mètres. Une validation

expérimentale, d'abord en laboratoire puis sur le VLT, est de plus en cours grâce au démonstrateur d'OAMC MAD (Marchetti et al. [9]) développé par l'ESO.

Désormais l'astronomie au sol est tournée vers la future construction des ELT, dont l'utilisation est intimement liée au développement des OA associées. Le dimensionnement de l'OAMC pour les ELT (Ragazzoni et al. [10]) est un problème complexe qui ne peut se résumer à une simple mise à l'échelle des systèmes existants compte tenu des limites technologiques et des caractéristiques de la turbulence aux grandes échelles spatiales. La simulation de ces futurs instruments est aussi un défi majeur (Le Louarn et al. [8]).

L'étude de la physique de l'atmosphère solaire requiert aussi des observations à haute résolution angulaire, de l'ordre du dixième de seconde d'arc, sur des champs de quelques minutes d'arc. La communauté internationale solaire est donc très active en OA. La structure même du soleil (granulation) peut être utilisée pour l'analyse de front d'onde ce qui en fait un objet de choix pour la multi-analyse et l'OAMC (von der Lühé et al. [11]). Les premières images solaires corrigées par OAMC viennent d'ailleurs d'être enregistrées. A noter que les télescopes solaires actuels ont des diamètres de l'ordre du mètre, mais un projet de télescope de 4 mètres (ATST) est actuellement à l'étude. L'OA jouera un rôle majeur dans la conception de ce futur instrument.

L'Office national d'études et de recherches aérospatiales, en collaboration avec les laboratoires européens participants au Research and Training Network on 'OA for ELTs' (financement de l'Union européenne), a organisé, sous l'égide de l'Académie des sciences, une Journée Scientifique à l'ONERA pour faire le point sur ce sujet et manifester la vitalité de cette thématique. Ce volume des Comptes rendus rassemble la plupart des communications faites par les orateurs invités à cette Journée. Les principaux acteurs du domaine en Europe ont contribué à ce dossier et les sujets les plus dynamiques sont abordés. Ce volume permet donc de faire le point des acquis et des problèmes à résoudre. Il devrait être un outil de travail pour la communauté de l'OA, actuellement en pleine ébullition compte tenu des défis à relever pour la construction des futurs ELT d'ici 2015.

## References

- [1] S. Esposito, Introduction to Multi-Conjugate Adaptive Optics systems, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [2] F. Rigaut, C. d'Orgeville, On practical aspects of Laser Guide Stars, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [3] N. Hubin, R. Arsenault, R. Conzelmann, B. Delabre, M. Le Louarn, S. Stroebele, R. Stuik, Ground Layer Adaptive Optics, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [4] E. Gendron et al., FALCON: multi-object AO, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [5] T. Fusco et al., Wavefront sensing issues in MCAO, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [6] C. Petit, J.-M. Conan, C. Kulcsár, H.-F. Raynaud, T. Fusco, J. Montri, D. Rabaud, Optimal control for Multi-Conjugate Adaptive Optics, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [7] W. Gaessler et al., LINC-NIRVANA: MCAO toward Extremely Large Telescopes, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [8] M. Le Louarn, C. Verinaud, V. Korhikoski, Simulation of MCAO on (extremely) large telescopes, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [9] E. Marchetti et al., MAD: practical implementation of MCAO concepts, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [10] R. Ragazzoni, B. Le Roux, C. Arcidiacono, Multi-Conjugate Adaptive Optics for ELTs: constraints and limitations, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.
- [11] O. von der Lühé, T. Berkefeld, D. Soltau, Multi-conjugate solar adaptive optics at the Vacuum Tower Telescope on Tenerife, C. R. Physique 6 (10) (2005), this issue.

Jean-Marc Conan

Office national d'études et de recherches aérospatiales,  
BP 72, 92322 Châtillon cedex, France  
E-mail address: jean-marc.conan@onera.fr (J.-M. Conan)

Gérard Rousset

Université Paris 7 – Denis-Diderot,  
LESIA, Observatoire de Paris,  
5, place Jules Janssen,  
92195 Meudon cedex, France

Office national d'études et de recherches aérospatiales,  
BP 72, 92322 Châtillon cedex, France  
E-mail address: gerard.rousset@obspm.fr (G. Rousset)