

COMPRENDRE ...

... l'optique adaptative

Depuis le début du vingtième siècle, la taille des télescopes ne cesse d'augmenter. Leur diamètre, de l'ordre de la dizaine de mètres aujourd'hui, devrait atteindre plus de quarante mètres dans les années à venir. Cette escalade vers les grands diamètres a deux principaux objectifs : augmenter le flux total collecté – ce dernier est proportionnel au carré du diamètre du miroir primaire du télescope –, donc la sensibilité des instruments scientifiques, et améliorer la résolution angulaire sur l'objet observé. Ceci nécessite en particulier la mise en œuvre de systèmes d'optique adaptative.

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

Onera/Dota/HRA

Marie-Therese.Velluet@onera.fr

La nécessité de l'optique adaptative

La résolution angulaire sur l'objet observé est intrinsèquement limitée par la réponse impulsionnelle du télescope. En l'absence d'aberration et pour une pupille circulaire, la réponse impulsionnelle est une tâche d'Airy dont la largeur à mi-hauteur est le rapport de la longueur d'onde d'observation par le diamètre du télescope (λ/D). Ainsi, pour un télescope de 8 mètres de diamètre observant dans l'infrarouge proche (longueur d'onde de 2 microns), la résolution ultime est de 52 millisecondes d'arc (ce qui correspond à 25 cm depuis une distance de 1000 km). Si le premier objectif (flux collecté) est atteint, il n'en va pas de même, dans le cas de l'observation depuis le sol, pour la résolution. Cette dernière va être très sévèrement limitée à quelques secondes d'arc par la turbulence atmosphérique.

Les effets de la turbulence atmosphérique

Les fluctuations de température de l'air créent des variations locales de l'indice de l'air qui n'est plus ni constant ni homogène sur le trajet de propagation. Ceci va introduire des avances et retards de phase le long du trajet optique pour aboutir *in fine* à un front d'onde déformé sur la pupille du télescope, entraînant une dégradation de l'image au foyer de

l'instrument d'optique. Ces fluctuations évoluent très rapidement, sur une échelle de temps de l'ordre de la milliseconde. Ainsi, on peut assimiler l'atmosphère turbulente à un système optique déformant et dynamique. On caractérise l'influence de la turbulence sur la résolution angulaire des instruments par le diamètre r_0 (diamètre de Fried). Plus la turbulence sur le trajet est importante et plus r_0 est petit. Un télescope dont le diamètre est supérieur à r_0 sera affecté par la turbulence. Sa résolution sera non plus λ/D mais λ/r_0 . Pour des sites de bonne qualité, r_0 est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. Un télescope de 8 mètres tel que le VLT (*Very Large Telescope*) implanté au mont Paranal au Chili est donc très affecté par la turbulence.

Les solutions

r_0 décroissant avec la longueur d'onde, le télescope sera moins affecté par la turbulence si la bande spectrale d'observation se situe plutôt dans l'infrarouge que dans le visible. La turbulence étant particulièrement importante dans les premiers kilomètres au-dessus du sol, le télescope sera implanté sur un site astronomique très élevé.

La solution ultime est bien évidemment d'envoyer le télescope dans l'espace comme c'est le cas pour le Hubble Space Telescope. Toutefois, ces alternatives sont très coûteuses, surtout pour des télescopes de grands diamètres. Ainsi, Hubble est restreint à 2,4 mètres et son successeur en cours de réalisation (le *James Webb Space Teles-*

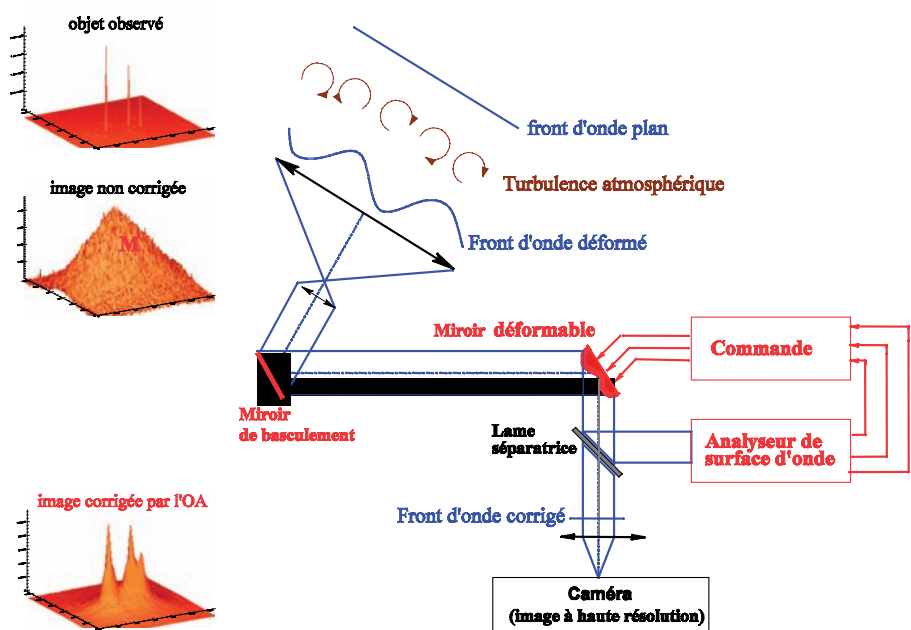


Figure 1. Schéma de principe de l'optique adaptative.

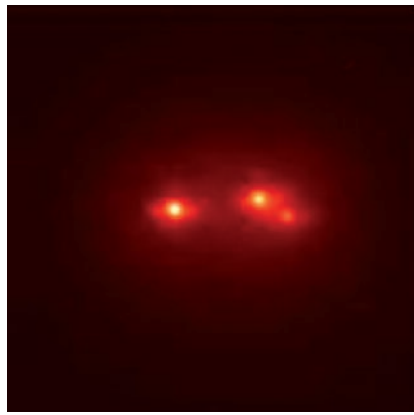
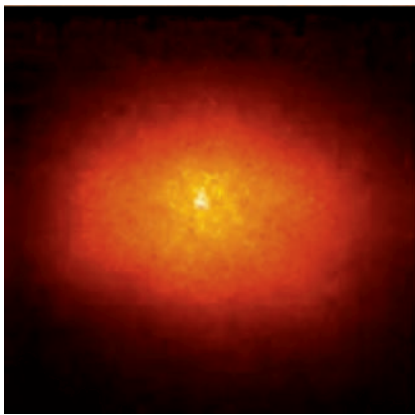


Figure 2. Image d'une étoile triple observée à l'observatoire de Haute-Provence, à gauche sans optique adaptative, à droite avec BOA, le banc d'optique adaptative de l'Onera. L'optique adaptative permet de distinguer les trois composantes.

cope) ne dépassera pas les 6,5 mètres. Il est donc essentiel, tout en restant au sol, de trouver un moyen de s'affranchir des effets de la turbulence atmosphérique. Ce sera le rôle de l'optique adaptative (OA). Si le concept d'OA est relativement ancien – la proposition initiale date des années 50 – la mise en œuvre pratique est quant à elle bien plus récente – fin des années 70 pour les applications militaires et fin des années 80 pour les applications liées à l'astronomie – essentiellement du fait de la complexité technologique des composants clés du système.

■ Le rôle de l'optique adaptative

Ainsi, l'optique adaptative a pour but de corriger en temps réel les perturbations du front d'onde. C'est un système asservi (figure 1) qui fonctionne en boucle fermée. Une partie du flux émis est utilisée pour mesurer les déformations de front d'onde via un analyseur de surface d'onde. La correction est réalisée à l'aide d'un miroir déformable qui se trouve en amont de l'analyseur. Celui-ci mesure les résidus de phase après correction par le miroir. Les tensions de commande du miroir sont calculées en temps réel par un calculateur numérique à partir des mesures de l'analyseur. La surface du miroir est ainsi déformée inversement au front d'onde incident. Le but est de tendre vers un front d'onde le plus plan possible et donc vers une image corrigée, enregistrée en aval du système d'optique adaptative, la plus

proche possible de celle obtenue avec un télescope parfait en l'absence de turbulence (figure 2).

Les différentes parties d'un système d'optique adaptative

■ Le miroir déformable

Le miroir déformable est le cœur optique d'un système d'optique adaptative. Il doit s'adapter aux défauts de phase au cours du temps. Pour ce faire, sa surface doit pouvoir se déformer localement de quelques microns. Le nombre de points de déformation dépend des performances ultimes recherchées et du rapport D/r_0 : il est par exemple de l'ordre de quelques centaines pour un télescope de 8 mètres fonctionnant dans l'infrarouge. De même, le temps caractéristique de déformation doit permettre de suivre l'évolution temporelle de la turbulence, c'est-à-dire être typiquement plus petit que quelques millisecondes. De nombreuses technologies existent (ou sont en cours de développement) pour atteindre ces performances. Ainsi les tailles des miroirs déformables peuvent varier selon les cas de quelques centimètres – on utilise alors des microtechnologies et la force électrostatique pour déformer le miroir – à plus d'un mètre : on parle alors de miroir secondaire adaptatif, utilisant dans ce cas la force électromagnétique. Toutefois, aujourd'hui, les plus couramment utilisés sont des miroirs de quelques dizaines

de centimètres, utilisant des matériaux piézo-électriques pour assurer la déformation.

Notons que la plupart des systèmes d'optique adaptative intègrent en complément du miroir déformable un miroir de basculement (ou miroir *tip-tilt*). Ce dernier a pour fonction de corriger le mouvement global de l'image et de réduire ainsi l'amplitude des déformations à produire par le miroir déformable lui-même.

■ La commande

Le calcul de la commande du miroir déformable à partir des mesures de front d'onde est un problème d'automatique sur système asservi en présence de retard. Des solutions simples sont mises en œuvre sur les systèmes d'optique adaptative classiques actuels. Cette thématique est cependant en plein développement pour répondre aux nouveaux enjeux, notamment la correction à très haute performance et la correction dans un grand champ. Les travaux théoriques sur la commande optimale sont associés bien sûr à la définition d'architectures informatiques pour calculer la commande sans induire de retard temporel additionnel.

■ L'analyse de surface d'onde

Dans le domaine optique, les détecteurs sont seulement sensibles à l'intensité du champ électromagnétique. La mesure de la phase de l'onde s'effectue en détectant un signal intermédiaire. Une solution largement utilisée en métrologie consiste à enregistrer le réseau d'interférences entre l'onde à mesurer et une onde de référence. Comme il est difficile en optique adaptative de disposer d'une onde de référence cohérente avec l'onde à caractériser, cette méthode est rarement utilisée. On a recours le plus souvent à un analyseur de front d'onde dont la mesure porte en général sur la pente ou sur la courbure de la surface d'onde. Un tel analyseur de front d'onde peut fonctionner en régime incohérent avec un spectre large. Il permet alors d'avoir accès à un écart normal et caractérise une aberration. Il peut même dans certains cas effectuer la mesure sur un

objet étendu. Il mesure alors l'aberration moyennée sur l'objet.

Une limitation à la mesure de front d'onde est donnée par le rapport signal sur bruit. Lorsque les objets naturels ne sont pas assez lumineux, comme c'est le cas en astronomie, une solution consiste à créer une étoile artificielle au-dessus de la turbulence, dans les hautes couches de l'atmosphère, par exemple en excitant les atomes de sodium qui sont présents à 90 km d'altitude. Toutefois, du fait que l'étoile traverse la turbulence à l'aller et au retour, cette méthode ne permet pas la mesure du basculement du front d'onde.

Comment améliorer les performances ?

■ Élargir le champ avec l'optique adaptative multiconjuguée

Les perturbations de front d'onde induites par la turbulence atmosphé-

rique varient dans le champ de vue. En effet, la turbulence étant distribuée dans tout un volume en amont de la pupille, les faisceaux issus des différents points du champ ne traversent pas les mêmes zones de turbulence (figure 3). Ce phénomène dit d'*anisoplanétisme* limite les performances des systèmes d'optique adaptative classiques : le volume turbulent ne peut être pleinement corrigé par un unique miroir déformable conjugué de la pupille de l'instrument. L'optique adaptative 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 infrarouge). 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 mètres, la couverture de ciel n'est que de quelques pour 100. L'utilisation d'étoiles artificielles, comme évoqué précé-

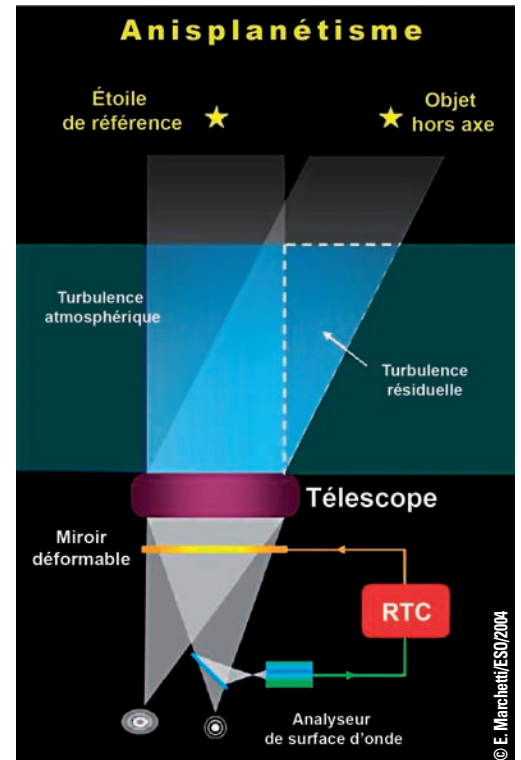


Figure 3. Effet de l'anisoplanétisme.

© E. Marchetti/ESO/2004

demment, permet d'améliorer la couverture, mais cette solution n'est pas sans difficulté.

L'émergence récente de nouveaux concepts d'optique adaptative permet cependant de pallier ces limitations et d'envisager des observations à grand champ. Ces nouvelles approches sont rassemblées sous le terme générique d'optique adaptative multiconjuguée (OAMC). Le concept OAMC originel (figure 4) est basé sur deux nouvelles idées maîtresses : l'utilisation simultanée de plusieurs étoiles guides dans le 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. Pour un télescope de classe 10 mètres, dans le proche infrarouge, on a montré qu'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, deux à trois miroirs déformables suffisent ; la complexité d'un tel système d'OAMC reste donc raisonnable.

Durant les cinq dernières années, la recherche a été très active dans ce domaine, et on peut dire que l'optique adaptative a pris un nouvel essor avec l'apparition de nombreuses variations autour du thème de l'OAMC : *Ground Layer AO* pour une faible correction dans un très grand champ, *Multi-Object AO* pour une correction sur de nombreuses galaxies très faiblement lumineuses mais de petite dimension angulaire.

■ Introduire du traitement d'image

Malgré toutes les possibilités décrites ci-dessus, l'optique adaptative ne corrige pas totalement la turbulence. On peut alors encore améliorer ses performances en réalisant une restauration de l'image afin de restituer les détails fins de l'objet observé (figure 5). En utilisant des approches basées sur les théories de traitement du signal et des

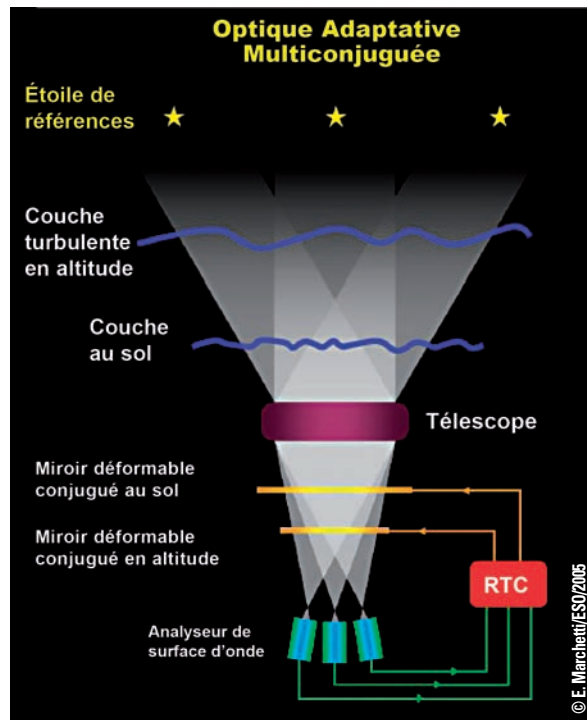


Figure 4. Schéma de principe de l'optique adaptative multiconjuguée.

images, de nombreuses techniques ont vu le jour au cours des dernières années en s'adaptant aux contraintes liées à l'observation et aux types objets étudiés. D'un point de vue général, elles consistent à déconvoluer l'image enregistrée au plan focal de l'instrument en

utilisant les informations données par l'analyseur de front d'onde, la connaissance de l'instrument, des statistiques sur la turbulence et en particulier une connaissance de la réponse impulsionnelle du système complet (turbulence, optique adaptative et instrument optique détection comprise).

La multiplication des applications

L'optique adaptative, complétée par un traitement d'image optimisé, est aujourd'hui un composant essentiel, pour ne pas dire indispensable, à tout grand télescope. Elle représente une révolution majeure pour l'imagerie à haute résolution angulaire et voit depuis peu ses champs d'application se diversifier et quitter l'astronomie et la défense pour investir le domaine du contrôle des lasers de puissance, de la médecine, des télécommunications optiques, de la micro- et nanolithographie et certainement bien d'autres dans les années à venir. La démocratisation de cette rupture technologique représente la prochaine étape dans son développement.

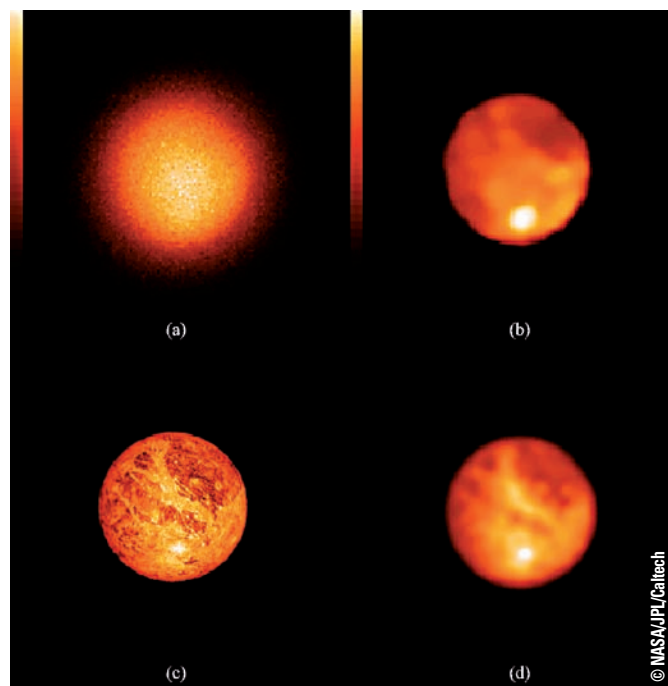


Figure 5. Ganymède (satellite de Jupiter) vue par le banc d'optique adaptative BOA à l'observatoire de Haute-Provence (OHP).

- a. Image de Ganymède prise au télescope de 1,52 m de l'OHP sur le banc d'optique adaptative BOA de l'Onera.
- b. Déconvolution par MISTRAL.
- c. Image synthétique de Ganymède obtenue à partir d'images large bande d'une base de données d'une sonde NASA.
- d. Image (c) convoluée par la tâche d'Airy d'un télescope de diamètre 1,52 m, pour comparaison avec l'image déconvoluée.

© NASA/JPL/Caltech