

# Les étoiles laser artificielles

Costel SUBRAN – Président Directeur Général, Opton Laser International  
 Wilhelm KAENDERS – CEO, Toptica Photonics  
 Françoise MÉTIVIER  
[francoise.metivier@edpsciences.org](mailto:francoise.metivier@edpsciences.org)

Les progrès récents dans les technologies des lasers de puissance ont permis la « fabrication » d'étoiles artificielles pour la prochaine génération des observatoires astronomiques. Ces étoiles artificielles, proches des champs d'observation, servent de guide pour les mesures astronomiques de grande précision.

## Pourquoi des étoiles laser ?

### Les contraintes des observations astronomiques au sol

Les observations astronomiques à partir des télescopes terrestres sont limitées par la dégradation des images due aux turbulences de l'atmosphère. Ces perturbations limitent la qualité et la résolution des images enregistrées. Ceci a conduit les chercheurs américains à concevoir et à lancer dans l'espace le télescope Hubble, afin de s'affranchir des distorsions atmosphériques. Cette solution, très coûteuse et limitée, ne suffit plus aux progrès récents des télescopes modernes.

Parallèlement, les besoins des astronomes pour obtenir, à partir du sol, des images de très haute résolution ont imposé l'utilisation d'un certain nombre de technologies très complexes. Les réalisations récentes ont par exemple conduit à fabriquer des télescopes avec des miroirs de plus en plus grands et lourds, ce qui était inimaginable il y a quelques décennies encore. Plusieurs sociétés européennes parmi lesquelles figurent Schott et la SAGEM, ont développé et fabriquée pour l'ESO (European Southern Observatory) et sa principale base d'observations astronomiques au Chili, des miroirs dont le diamètre de 8,20 mètres reste encore inégalé à ce jour. Ce gain en résolution grâce à des miroirs primaires de grand diamètre a été accompagné par l'implémentation de réseaux complexes composés de plusieurs télescopes.

La majorité des télescopes de l'Agence Spatiale Européenne a été installée au sommet des montagnes de Paranal, en plein Désert d'Atacama, emplacement

quasi idéal grâce à son atmosphère sèche, et donc claire pour les observations. Néanmoins, même ce positionnement « idéal » est limité par les distorsions du front d'onde causées par les turbulences atmosphériques de la colonne de gaz située au-dessus du télescope. L'optique adaptative, utilisée depuis de nombreuses années, permet de modifier en temps réel, localement et temporairement, le rayon de courbure d'un miroir, situé entre les miroirs primaires et l'image, jusqu'à des fréquences possibles de 1 kHz, afin de permettre la correction de ces distorsions de front d'onde. Ces

miroirs déformables sont montés sur des milliers d'actionneurs piézoélectriques discrets à empilement. Cette compensation active des effets de l'atmosphère terrestre a permis aux astronomes d'obtenir des images fabuleuses et de pénétrer encore plus loin les secrets des galaxies.

### Disposer d'une étoile « guide »

Les systèmes d'optique adaptative ont besoin pour fonctionner de se caler sur une étoile brillante. La mesure, à l'aide d'un analyseur, de la déformation du front d'onde de ses sources ponctuelles permet de corriger les images en temps réel.



Figure 1. Faisceau laser jaune visible dans le ciel par diffusion Rayleigh avec un long temps d'exposition.

### Un exemple de laser utilisé pour générer des étoiles laser

Un des schémas arrêté est un système composé d'un oscillateur diode laser en cavité externe stabilisé à 1178 nm présentant moins de 100 kHz de largeur spectrale, dont le faisceau est injecté dans deux amplificateurs Raman à fibre de puissance permettant d'obtenir 20 W de puissance dans deux bras optiques, constituant des faisceaux cohérents, polarisés et très fins spectralement. Les deux faisceaux sont recombinaés dans un interféromètre de Michelson à fibre afin de générer une puissance de 36 W à 1178 nm. Une cavité résonnante réalise ensuite un doublement de fréquence et convertit la longueur d'onde à 589 nm avec une efficacité supérieure à 75 %. Le laser final est un laser jaune de plus de 20 W de puissance, accordable sur 30 GHz, avec une largeur de raie inférieure à 1 MHz. Ce laser sera monté dans le télescope VLT (Very Large Telescope) Yepun UT4 de l'ESO à Cerro Paranal au Chili en 2013.



### Les limitations des étoiles laser

Maintenant largement utilisées sur les grands télescopes, les étoiles laser présentent néanmoins des limitations qui vont être cruciales pour leur utilisation sur les télescopes extrêmes en cours de définition. Parmi ces limitations, on peut citer la nature même de la couche de sodium, qui ne représente qu'un dixième de la distance terre-étoile laser, les inhomogénéités spatiales et les fluctuations temporelles de la concentration en sodium. Parallèlement, de nouvelles aberrations comme l'agrandissement du spot, ou les erreurs de focalisation ou de détermination du mouvement global de l'étoile (tilt) deviennent prépondérantes. L'utilisation de batteries d'étoiles ou de lasers impulsionsnels permet en partie de s'affranchir de ces limitations. Notons que le développement d'étoiles polychromatiques, permettant de solliciter deux transitions du sodium, un temps présenté comme une des solutions au problème de tilt, a été finalement abandonné il y a un an.

L'utilisation de lasers impulsionsnels générant de fortes puissances crêtes se heurte au phénomène de saturation de la transition des atomes de sodium et conduit les équipes en charge du développement des sources lasers capables de générer des étoiles laser à se tourner vers des solutions originales : lasers mode-bloqués à fort taux de répétition (typiquement 80 MHz) ou lasers sans mode. Ce dernier type de laser peut augmenter l'intensité de l'étoile laser d'un facteur 5 par rapport à un laser monomode et d'un facteur 2,5 par rapport à un laser monomode suivi d'un système de modulation de phase.

Remerciements : Merci à Jean-Paul Pique (Université Grenoble 1/CNRS, LIPhy UMR 5588) pour ses conseils et son expertise.

#### Référence

Jean-Paul Pique, Vincent Fesquet, Sylvie Jacob, "Pulsed frequency-shifted feedback laser for laser guide stars: intracavity preamplifier", Applied Optics, Vol. 50, No. 33 (20 November 2011).

Ces étoiles de référence ont été pendant longtemps des étoiles brillantes naturelles (NGS- *Natural Guide Stars*). Malheureusement, ces étoiles « guides » occupent uniquement quelques pourcents du ciel et ne sont disponibles que dans quelques segments du ciel nocturne. Comment trouver une autre étoile de référence, une étoile proche du champ d'observations, une étoile voisine très brillante, une étoile « guide » ?

Pour répondre à ces préoccupations, l'idée a été de créer des étoiles artificielles à l'aide des lasers. Ces nouveaux guides, connus sous le nom de LGS (*Light Guide Stars*), peuvent être ainsi produits dans n'importe quelle direction dans le ciel, donc dans la direction de l'objet à observer, selon les besoins des astronomes (figure 1).

### Comment produire ces étoiles ?

L'atmosphère terrestre contient dans la couche nommée mésosphère, à des altitudes de 90 à 110 km, une concentration assez élevée d'atomes métalliques légers de sodium. La zone semble avoir été formée par des débris cosmiques prove-

nant des météorites. Cette couche va être utilisée comme « écran de projection » vers laquelle sera dirigé un faisceau laser à une longueur d'onde de 589 nm, longueur d'onde correspondant à la raie D2 du sodium et qui génère, en un point situé à cette altitude, et grâce à son interaction avec les atomes de sodium, une fluorescence très intense, similaire à une étoile.

Afin d'obtenir une étoile extrêmement brillante, donc un flux lumineux suffisamment fort, les lasers utilisés doivent être des lasers de puissance supérieure à 20 W, émettant à 589 nm avec une largeur de raie permettant de s'accorder sur la structure hyperfine des atomes de sodium (voir encadré).

Les télescopes équipés d'étoile guide laser sont prévus également avec des systèmes de détection des avions, civils ou militaires, afin d'éviter leur illumination. L'installation complète de quatre systèmes d'étoiles laser permet ainsi de compenser les turbulences atmosphériques dans un champ très large d'observation. Cette technologie sera aussi installée sur la prochaine génération du télescope européen, le « European Extremely Large Telescope » équipé d'un miroir de 42 mètres.