

L'ESSENTIEL

> Les turbulences atmosphériques limitent le pouvoir de résolution des télescopes au sol.

> Pour corriger ces effets, les observatoires sont équipés de systèmes d'optique adaptative. Ceux-ci compensent en temps réel ces turbulences en déformant la surface d'un miroir dans le télescope.

> L'optique adaptative pourrait maintenant servir à suivre les débris en orbite autour de la Terre, voire à les dévier pour éviter certaines collisions catastrophiques.

> La cryptographie quantique pourrait aussi en bénéficier, grâce à une focalisation plus précise des lasers vers les satellites de télécommunication.

LES AUTEURS



TONY TRAVOILLON
maître de conférences en astronomie et instrumentation spatiale à l'Université nationale australienne, à Canberra



CÉLINE D'ORGEVILLE
professeure en instrumentation pour l'astronomie et le domaine spatial à l'Université nationale australienne



FRANCIS BENNET
maître de conférences en instrumentation optique à l'Université nationale australienne

L'optique adaptative, au-delà des étoiles

En équipant leurs télescopes d'un système qui corrige les perturbations dues aux turbulences atmosphériques, les astronomes sont capables de scruter le ciel avec une netteté exceptionnelle. Cette technique pourrait aussi servir à la lutte contre les déchets spatiaux et à la cryptographie quantique.

Tout le monde apprécie un bon tour de magie. C'est le genre de spectacle auquel assistent les astronomes quand ils «ferment la boucle de correction» du système d'optique adaptative qui équipe certains télescopes. L'image d'un objet cosmique, initialement floue, devient alors très nette et riche en nouveaux détails. Grâce à cette technique, les instruments d'observation compensent les perturbations causées par les turbulences de l'atmosphère. Cet outil a été une révolution dans le domaine de l'astronomie.

En 2020, notre équipe de l'Université nationale australienne, à Canberra, a fermé la boucle d'un système d'optique adaptative avec un objectif très différent. Il n'était pas question de scruter les détails d'un astre, mais ceux de débris spatiaux ! Dans la salle de contrôle de l'observatoire du mont Stromlo, qui surplombe la ville, nous avons sélectionné, pour notre premier essai, un satellite météorologique. Sa silhouette caractéristique avec un corps large et de grands panneaux solaires en faisait une cible facile, idéale pour évaluer les performances de notre dispositif.

Pour certains d'entre nous, c'était la première fois qu'ils utilisaient un télescope pour observer autre chose qu'une étoile, une galaxie ou tout autre phénomène cosmique. Notre cible est l'un des milliers d'objets fabriqués par l'homme et mis en orbite autour de la planète. Or avec un essaim d'engins spatiaux (certains actifs, la plupart non) toujours croissant, les risques d'encombrer les orbites terrestres basses sont de plus en plus grands. Comment résoudre le problème des déchets spatiaux et préserver ces orbites pour des utilisations futures ? Au cours des trente dernières années, les systèmes d'optique adaptative ont gagné en performance et les astronomes se sont alors rendu compte qu'ils pouvaient mettre à contribution leur expertise dans des projets de développement et de construction de systèmes de gestion des déchets spatiaux. Notre test s'inscrivait dans cette démarche.

AUX PRISES AVEC L'ATMOSPHÈRE

La couche gazeuse qui entoure la Terre nous permet d'y vivre, mais, pour les astronomes, elle est surtout une source de perturbations qui dégrade la qualité des observations.



Le VLT, le très grand télescope de l'Observatoire européen austral, au Chili, est équipé d'un laser. Cet instrument crée dans l'atmosphère une « étoile artificielle » en excitant des atomes de sodium à près de 90 kilomètres d'altitude. Cette « étoile » sert à calibrer le système d'optique adaptative qui corrige les effets des turbulences de l'atmosphère sur les images du télescope.

Au lieu de filer en ligne droite, les photons venant d'étoiles lointaines voient leurs trajectoires déviées à cause du phénomène de réfraction. Quand la lumière passe d'un milieu à un autre caractérisé par des conditions distinctes (de densité, température, composition, etc.), elle change de vitesse et de direction. La réfraction explique, par exemple, qu'une paille dans un verre d'eau semble faire un angle à l'interface entre l'eau et l'air.

Dans le cas des observations astronomiques, l'atmosphère est un milieu turbulent comportant des masses d'air de températures différentes et en mouvement: quand la lumière passe de l'air chaud à l'air froid, elle change de trajectoire. Ces turbulences sont à l'origine du scintillement des étoiles et de la difficulté des astronomes à obtenir des images nettes et précises des objets situés au-delà de l'atmosphère.

Nous quantifions l'impact des turbulences de l'air avec un paramètre, la «qualité de la visibilité» (ou *seeing* en anglais), qui décrit la taille angulaire de la tache floue d'un astre vu par un télescope au sol. Plus l'atmosphère est turbulente, plus la qualité de la visibilité est médiocre. Dans un bon site, typiquement au sommet d'une montagne et avec une turbulence faible, la qualité de la visibilité est comprise entre 0,5 et 1 seconde d'arc. Cela signifie que n'importe quel télescope sera limité à une résolution de cet ordre et sera dans l'impossibilité d'observer des détails plus petits.

Or, dans l'absolu, les télescopes modernes sont capables de faire bien mieux en termes de résolution. D'un point de vue purement optique, la résolution d'un télescope est dictée par la «limite de diffraction», qui est proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière collectée et inversement proportionnelle au diamètre du télescope qui collecte cette lumière. Les longueurs d'onde que nous pouvons observer ne dépendent que de la composition chimique et surtout de la température de nos cibles célestes, et nous n'avons aucun moyen d'agir sur ce paramètre.

La seule façon de construire des télescopes capables de résoudre des objets de plus en plus petits est donc d'accroître leur diamètre. Un télescope équipé d'un miroir de 2 mètres peut, par exemple, résoudre des objets de 0,05 seconde d'arc dans les longueurs d'onde optiques (ce qui équivaut à distinguer une grande pièce de monnaie située à 100 kilomètres). Mais même sur un site bénéficiant d'une visibilité de bonne qualité, l'atmosphère dégradera cette résolution d'un facteur 10.

On voit immédiatement l'intérêt de placer des télescopes dans l'espace, hors de portée des effets de l'atmosphère. Néanmoins, il reste d'excellentes raisons de construire des observatoires au sol. Les télescopes spatiaux sont limités en taille, parce que les fusées sont

limitées en charge. Il est également difficile d'envoyer des humains dans l'espace pour les entretenir et les moderniser. Le plus grand télescope spatial, le *James Webb Space Telescope* (JWST), dont le lancement est prévu à la fin de l'année 2021, est composé d'un miroir primaire de 6,5 mètres de diamètre. Au sol, les plus grands miroirs de télescope font plus de 10 mètres de diamètre; en cours de construction, l'ELT (pour *Extremely Large Telescope*), le télescope géant européen, aura un miroir primaire de 39 mètres. On peut en outre perfectionner les télescopes au sol tout au long de leur vie, en les équipant de nouveaux instruments à la pointe de la technologie. Mais pour tirer le meilleur parti de ces télescopes, nous devons activement soustraire les effets de l'atmosphère.



Les militaires américains ont utilisé l'optique adaptative dès les années 1970

Les principes de l'optique adaptative ont été posés au début des années 1950. Les militaires américains ont utilisé cette technique pour la première fois dans les années 1970, en particulier pour observer des satellites depuis le sol. Les astronomes, eux, ont dû attendre les années 1990 pour équiper leurs observatoires avec ce système.

L'optique adaptative repose sur trois éléments clés. Le premier est un capteur de front d'onde, c'est-à-dire une caméra numérique rapide qui cartographie en temps réel la distorsion des ondes lumineuses recueillies par le télescope. Parce que les mesures doivent suivre les changements rapides de l'atmosphère, le capteur doit établir une nouvelle carte plusieurs centaines de fois par seconde. Pour enregistrer assez de photons avec des temps d'exposition si courts, le capteur de front d'onde a besoin d'une source de lumière très brillante au-dessus de l'atmosphère. Or les astres du firmament sont en général trop faibles. Pour pallier ce problème, les astronomes créent tout simplement leurs propres «étoiles» artificielles en pointant un faisceau laser vers le haut.

Cette source lumineuse de référence (l'étoile guide laser) est la deuxième composante clé du système d'optique adaptative.