

Nous sommes maintenant entrés dans une ère où il est raisonnable de s'attendre à ce que tous les télescopes soient dotés de leur propre système d'optique adaptative. Et nous commençons à étendre l'utilisation de cette technique au-delà de l'astronomie.

UNE APPLICATION AU PROBLÈME DES DÉCHETS SPATIAUX

De façon ironique, une des nouvelles applications de l'optique adaptative n'est pas si récente, puisqu'elle faisait partie des raisons initiales qui avaient motivé les militaires à développer cette technique: l'observation de corps en orbite rapprochée autour de la Terre. Ce domaine de recherche, qui porte le nom de «connaissance de la situation spatiale» (CSS), inclut le suivi des satellites artificiels ainsi que celui des objets naturels (météoroïdes). Comme le nombre d'engins spatiaux et de débris en orbite croît, le risque de collision augmente, ce qui engendrerait encore plus de débris. Selon un scénario catastrophique, «le syndrome de Kessler», imaginé en 1978 par l'astrophysicien de la Nasa Donald Kessler, cette production de débris pourrait déclencher un effet en cascade qui rendrait certaines orbites complètement inutilisables.

Environ 34000 objets artificiels de plus de 10 centimètres sont actuellement en orbite autour de la Terre; seuls 10% sont des satellites actifs. La pollution spatiale s'accumule surtout aux altitudes les plus utilisées pour les activités humaines dans l'espace, essentiellement en orbite terrestre basse (entre 300 et 2000 kilomètres au-dessus du sol) et en orbite géostationnaire (aux alentours de 36000 kilomètres). On peut suivre les plus gros objets au moyen de radars, de télescopes optiques et de stations de poursuite laser. Mais il existe plusieurs centaines de milliers de morceaux de débris dont la taille est comprise entre 1 et 10 centimètres, auxquels s'ajoutent quelque 100 millions de débris de moins de 1 centimètre, dont la position est plus ou moins inconnue.

Les scènes de collision dans le film *Gravity* (2013) illustrent de façon spectaculaire ce qui se produirait si un gros débris spatial entraînait en collision, par exemple, avec la *Station spatiale internationale*. La vitesse de ces débris est telle que ces projectiles peuvent perforer et provoquer des dégâts importants, mettant en danger la vie des astronautes, ou rendre inopérants des satellites. La Nasa rapporte qu'au cours des vingt dernières années, la *Station spatiale* a dû effectuer en moyenne une manœuvre d'évitement par an pour échapper à une collision avec des débris spatiaux qui volent trop près. Et la tendance est à l'augmentation, avec trois manœuvres en 2020.

Si la situation perdure, ces déchets spatiaux qui semblent bien lointains pourraient vraiment perturber notre quotidien: notre mode de vie

repose pour une grande part sur des technologies spatiales. Les satellites sont nécessaires pour les communications par téléphones portables, pour la télévision et internet, bien sûr, mais aussi pour les systèmes de géolocalisation, les transactions bancaires, l'observation de la Terre pour les prévisions météorologiques, les secours d'urgence après les catastrophes naturelles, les transports et de nombreuses autres activités.

Il existe divers projets de nettoyage de l'espace, mais ces initiatives sont techniquement difficiles à mettre en œuvre, politiquement complexes à faire accepter et coûteuses. Des scientifiques, dont notre équipe à l'Université nationale australienne, explorent une autre piste. Ils développent des stratégies de gestion des déchets à partir du sol. Travailler depuis la terre ferme est plus facile et plus abordable, et peut reposer sur des techniques que nous maîtrisons déjà bien, comme l'optique adaptative.

Il existe des différences subtiles entre la façon dont nous utilisons l'optique adaptative pour l'astronomie et la façon dont nous l'appliquons à la CSS. La vitesse des satellites dépend de leur distance à la Terre. À une altitude de 400 kilomètres, la *Station spatiale internationale*, par exemple, se déplace à la vitesse de 8 kilomètres par seconde et effectue un tour complet en une heure et demie. C'est beaucoup plus rapide que le mouvement apparent du Soleil et des étoiles, qui mettent un jour entier à décrire un cercle au-dessus de nos têtes du fait de la rotation de la Terre.

DES CORRECTIONS BIEN PLUS RAPIDES QUE POUR LES ÉTOILES

À cause de cette vitesse élevée, quand les télescopes suivent les satellites, les turbulences atmosphériques apparentes changent beaucoup plus vite, et les systèmes d'optique adaptative doivent effectuer des corrections 10 à 20 fois plus rapidement que s'ils observaient des objets astronomiques. Nous devons aussi pointer le faisceau laser de l'étoile guide légèrement en avant du satellite pour sonder la région de l'atmosphère où le satellite se trouvera quelques millisecondes plus tard.

Dans ces conditions, l'optique adaptative sert à traquer et photographier des satellites et des débris en orbite terrestre basse, et à améliorer le suivi d'objets en orbites stationnaires basses, moyennes et géostationnaires. L'une des techniques qui nous permettent de suivre les objets spatiaux est le lidar (*light detection and ranging*, c'est-à-dire détection et télémétrie par ondes lumineuses). Nous projetons un laser de poursuite (à ne pas confondre avec le laser qui produit l'étoile guide) sur le ciel de façon qu'il soit réfléchi sur le satellite. Et nous mesurons le temps qu'il met à nous revenir afin de déterminer la distance précise entre le satellite et la Terre. Dans ce cas, le système

d'optique adaptative fonctionne «à l'envers»: il prépare le faisceau laser en déformant exprès sa lumière avant qu'il ne traverse les turbulences de l'atmosphère. Nous calculons les distorsions de telle sorte qu'elles annulent les effets des turbulences. Et le faisceau laser est bien focalisé lorsqu'il sort de l'atmosphère, comme s'il n'avait pas été perturbé.

En plus de suivre les débris spatiaux, nous espérons être capables de mettre à profit cette technique pour dévier des objets dont la trajectoire pourrait conduire à une collision. Nous voulons utiliser la pression de radiation exercée par la lumière quand elle est réfléchie sur un objet afin d'en modifier le mouvement. Pour que l'effet soit le plus efficace possible, nous avons besoin de l'optique adaptative afin de focaliser le faisceau laser précisément où nous voulons qu'il agisse. Des lasers d'une puissance de 10 kilowatts pourraient ainsi dévier les débris (les lasers de soudage ont typiquement une puissance de 50 kilowatts). Cette stratégie ne réduirait pas la quantité de débris en orbite, mais elle contribuerait à éviter les collisions entre débris, et peut-être retarder la réalisation du scénario catastrophe de Kessler. À terme, de tels systèmes pourraient être mis en œuvre tout autour de la Terre pour aider à gérer l'environnement spatial.

ÉPAULER LES TRANSMISSIONS QUANTIQUES

L'optique adaptative pourrait encore aider à une autre forme de sécurité, celle des communications. Pour éviter que des données sensibles ne soient interceptées et lues par un tiers, l'information est aujourd'hui chiffrée par des techniques qui reposent sur des problèmes mathématiques difficiles à résoudre en temps utile. Les systèmes de paiement en ligne et diverses autres applications utilisent de telles technologies de communications rapides et sécurisées. Mais ces méthodes fonctionnent uniquement parce que les ordinateurs actuels ne sont pas capables de résoudre assez vite les problèmes mathématiques sous-jacents. Or les ordinateurs quantiques, dont les performances ne cessent de progresser, seront bientôt en mesure de les mettre en défaut. Malgré le développement d'autres techniques de chiffrement innovantes pour sécuriser les données, personne n'a encore trouvé de protocole infailible. La physique quantique pourrait apporter une solution.

La cryptographie quantique (ou distribution quantique de clé) repose sur les propriétés des photons, les particules de la lumière, et sur les lois de la physique quantique. L'élément central de tout système de chiffrement quantique est la «clé»: une suite de 0 et de 1 que les interlocuteurs se partagent pour chiffrer et déchiffrer leurs messages. Des générateurs quantiques de

nombres aléatoires peuvent ainsi fournir des clés robustes (les générateurs classiques peuvent au mieux produire un pseudoaléa dont les clés peuvent être prédites). Ces clés sont générées à un rythme élevé, ce qui permet un usage unique. La difficulté pour deux interlocuteurs qui veulent établir une communication sécurisée est de s'échanger la clé sans qu'elle soit interceptée. La clé est transmise grâce à des photons. Or les lois de la physique quantique indiquent que si une personne tente de mesurer ce signal, il en modifie inévitablement la teneur. Les deux interlocuteurs se rendent alors compte que la clé a été compromise, ils l'éliminent et en réémettent une nouvelle jusqu'à ce qu'ils aient



Les communications optiques pourront rivaliser avec celles par ondes radio



la certitude d'être les seuls détenteurs de la clé pour chiffrer leurs messages.

La clé peut être transmise par fibre optique ou à travers l'atmosphère grâce à un faisceau laser émis depuis un télescope optique et relayée par des satellites, qui renvoient ensuite le signal vers le sol. Or, comme dans le cas des débris spatiaux, les perturbations atmosphériques dévient la lumière du laser. Avec la technique d'optique adaptative, on peut corriger les effets des perturbations atmosphériques pour mieux cibler le satellite relais. En focalisant ainsi le faisceau, on est en mesure d'augmenter de façon considérable la quantité de données transférées par ce biais.

Cette stratégie permettra aux télécommunications optiques de concurrencer les grandes antennes paraboliques radio, en y ajoutant l'avantage d'être compatible avec une utilisation quantique. Il y a bien sûr d'autres obstacles à surmonter avant d'implémenter des télécommunications quantiques; par exemple, il est nécessaire de savoir stocker et acheminer l'information quantique sans perturber l'état quantique. Mais les chercheurs travaillent activement sur ces défis, et nous espérons parvenir à terme à créer un réseau global sécurisé grâce à la physique quantique. L'optique adaptative est un élément clé pour concrétiser ce rêve.

Ainsi, une technique auparavant réservée à l'étude du cosmos pourrait bientôt nous aider