

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.

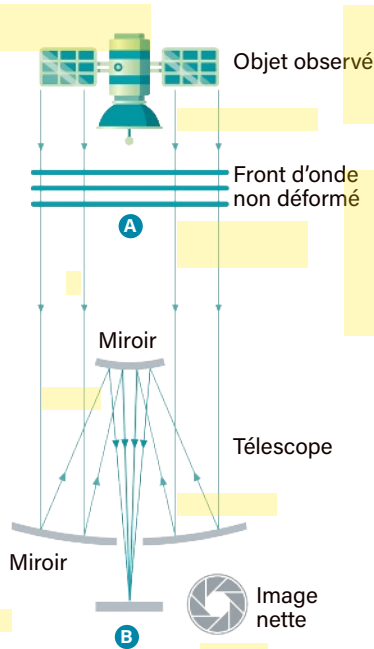
L'optique adaptative repose sur trois éléments clés. Le premier est un capteur de front d'onde, c'est-à-dire une caméra numérique rapide qui cartographie en temps réel la distorsion des ondes lumineuses recueillies par le télescope. Parce que les mesures doivent suivre les changements rapides de l'atmosphère, 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.

L'OPTIQUE ADAPTATIVE, COMMENT ÇA MARCHE ?

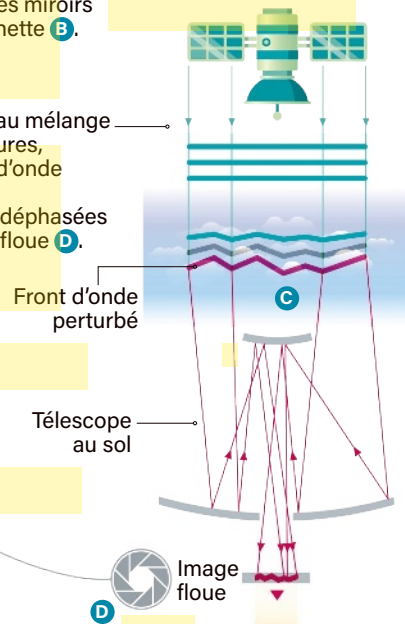
L'atmosphère de la Terre crée des distorsions indésirables sur les images obtenues par les télescopes au sol. Pour compenser ces effets atmosphériques, les astronomes utilisent des systèmes d'optique adaptative qui, à l'aide de miroirs déformables, corrigent les aberrations et produisent ainsi des images plus nettes.

Système sans distorsion



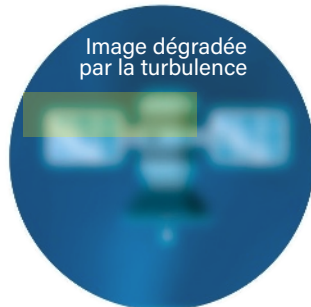
La lumière incidente issue de sources naturelles ou artificielles (comme ici un satellite) présente un front d'onde plat **A**. En l'absence de distorsions, la lumière est focalisée en un point par les miroirs du télescope, ce qui produit une image nette **B**.

Effet des perturbations atmosphériques



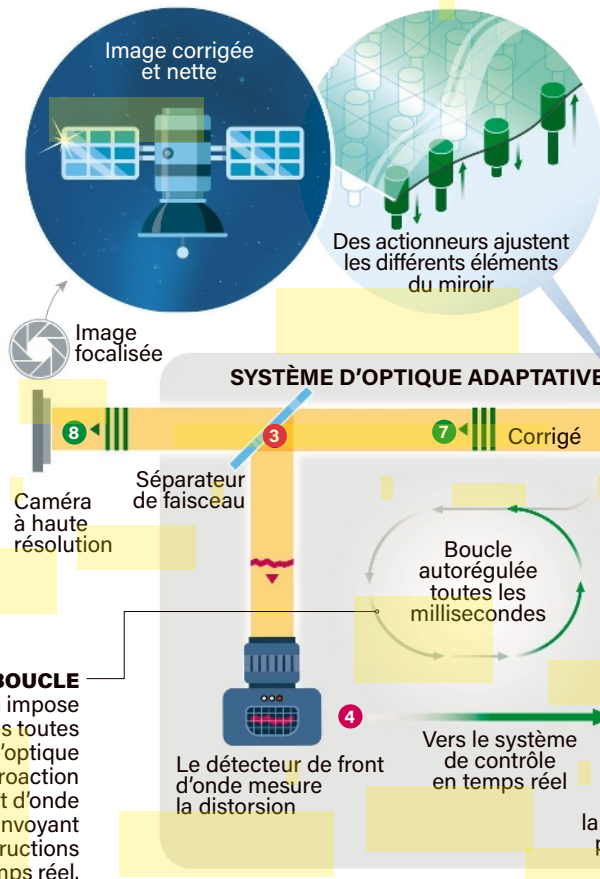
DISTORSION

Les turbulences atmosphériques, dues au mélange de masses d'air de différentes températures, ralentissent certaines portions du front d'onde et engendrent différents retards **C**. Les composantes de la lumière arrivent déphasées au point focal, ce qui produit une image floue **D**.



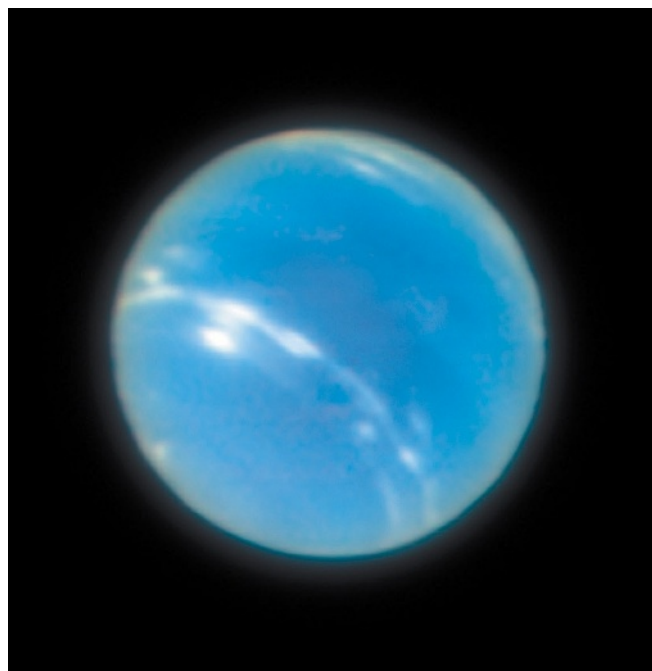
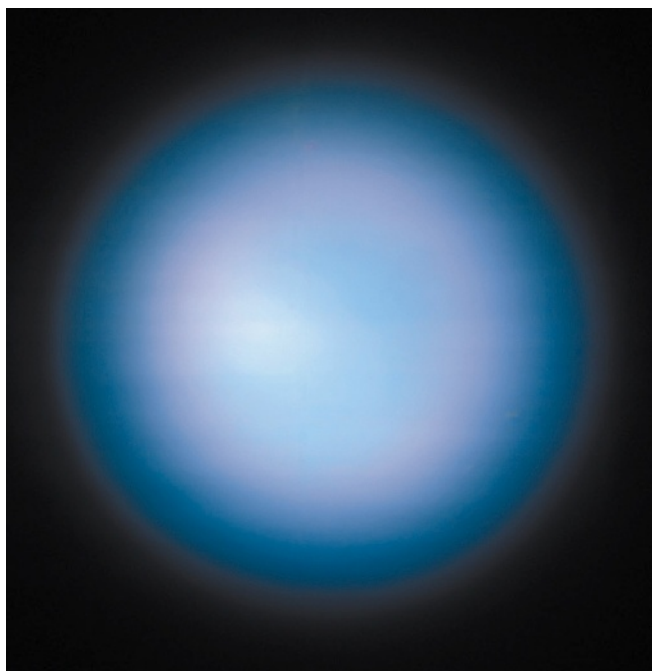
COMMENT L'OPTIQUE ADAPTATIVE CORRIGE LE PROBLÈME

Quand le faisceau lumineux pénètre dans un système d'optique adaptative **1**, il arrive sur un miroir déformable. Au début, le miroir n'est pas encore ajusté et reflète le front d'onde déformé **2**. La lumière est ensuite dirigée vers un séparateur de faisceau **3**, et une partie atteint un capteur qui analyse la distorsion du front d'onde **4**. Sur le même principe que celui des casques à réduction de bruit active, le système génère un signal de front d'onde « inverse » destiné à compenser la distorsion **5**, et des centaines d'actionneurs individuels ajustent la forme du miroir **6**. Le miroir est alors capable d'annuler la distorsion du front d'onde incident et reflète un front d'onde corrigé, plat **7**. Le séparateur en dirige une partie vers une caméra à haute résolution, qui enregistre l'image bien focalisée dont les scientifiques ont besoin **8**, et l'autre partie poursuit son chemin vers la boucle de correction suivante.



FERMER LA BOUCLE

L'atmosphère bouge très vite, ce qui impose au système d'effectuer des corrections toutes les millisecondes environ. Le système d'optique adaptative établit une boucle de rétroaction autorégulée, le capteur de front d'onde mesurant toute nouvelle distorsion et envoyant au miroir déformable des instructions de compensation en temps réel.



Deux images de la planète Neptune prises par le télescope VLT, la première avant la mise en route du système d'optique adaptative, la seconde après, illustrent l'efficacité de cette technologie.

L'atmosphère possède une couche riche en atomes de sodium de quelques kilomètres d'épaisseur à une altitude d'environ 90 kilomètres, bien au-dessus de la zone de turbulences à l'origine des distorsions. On excite les atomes de sodium à l'aide d'un laser émettant à une longueur d'onde bien choisie. Les atomes de sodium de la haute atmosphère absorbent la lumière orange vif du laser (de la même couleur que celle des lampadaires au sodium dans de nombreuses villes encore aujourd'hui). Puis ils réémettent ce rayonnement, ce qui produit une étoile artificielle orangée. Avec un laser couplé au télescope, l'étoile artificielle est toujours visible pour le capteur de front d'onde.

Ce dernier enregistre la forme du front d'onde émis par l'étoile artificielle. Il ne reste plus qu'à corriger les aberrations. C'est la tâche de la troisième composante majeure du système: le miroir déformable. Le miroir est constitué d'une mince membrane réfléchissante, sous laquelle se trouve un ensemble d'actionneurs (ou actuateurs), des mécanismes qui poussent ou tirent sur la membrane. La forme de la surface compense les distorsions de la lumière incidente, ce qui supprime de fait les défauts dus à l'atmosphère.

Les perturbations dues aux turbulences changent si vite que ces corrections doivent être réalisées toutes les millisecondes environ. C'est un incroyable défi, aussi bien mécanique qu'informatique. Les éléments déformables du miroir doivent pouvoir faire des milliers de mouvements chaque seconde, et ils doivent être appariés à un ordinateur et à un capteur de front d'onde capables de suivre un tel rythme. Il y a jusqu'à plusieurs milliers d'actionneurs, qui déplacent chacun sa portion de

miroir déformable de l'ordre de quelques micromètres. On dit que l'on «ferme la boucle» quand s'établit ce processus continu et autorégulé de mise à jour des déformations.

Bien que la technique soit complexe à mettre en œuvre, les astronomes ont atteint une bonne maîtrise de l'optique adaptative. Tous les grands observatoires sont aujourd'hui équipés de ce système. Il en existe même des versions spécialisées pour des types particuliers d'observations. L'optique adaptative «classique» utilise une seule étoile guide et un seul miroir déformable, ce qui ne permet de corriger les turbulences que sur une zone relativement restreinte du ciel. Des systèmes plus complexes, telle l'optique adaptative multiconjuguée, s'appuient sur plusieurs étoiles guides et plusieurs miroirs déformables pour mesurer et corriger un plus grand volume de turbulences atmosphériques au-dessus du télescope. Cette approche ouvre des fenêtres d'observation dix à vingt fois plus larges qu'avec l'optique adaptative classique, mais avec un coût nettement plus important.

TRAQUER LES EXOPLANÈTES

Dans d'autres situations, par exemple quand les astronomes veulent étudier une cible individuelle telle qu'une exoplanète, le facteur crucial n'est pas la taille du champ, mais une résolution d'image aussi parfaite que possible. Dans cette situation, un système d'optique adaptative extrême utilise des capteurs de front d'onde et des miroirs plus rapides et de meilleure résolution. Le dispositif est en général couplé avec un filtre qui bloque la lumière de l'étoile hôte, afin de distinguer la faible lueur des exoplanètes en orbite autour d'elle.

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