

# LA SCINTILLATION DES ÉTOILES

## 2. L'OPTIQUE ADAPTATIVE

Romain Maggiolo et Alexis Merlaud  
Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

*Depuis la première présentation officielle de lunette astronomique par Galilée en 1609, les instruments d'optiques destinés à l'observation spatiale n'ont cessé de s'améliorer. C'est en grande partie grâce eux que nous avons aujourd'hui une connaissance si détaillée de l'Univers et des astres qui le peuplent.*

*Les progrès de la technique ont permis d'améliorer la résolution – distance minimale entre deux points contigus pour qu'ils puissent être distingués – et la sensibilité – intensité minimale mesurable d'un signal lumineux – des instruments optiques. Cependant, les capacités intrinsèques de l'instrument ne sont pas le seul facteur limitant la qualité des observations. Comme nous l'avons évoqué dans un article publié dans le précédent numéro de Ciel & Terre sur la scintillation des étoiles, la lumière subit les effets de la turbulence atmosphérique qui brouille les images et en réduit le contraste et la résolution.*

*L'optique adaptative permet de corriger ces perturbations. C'est une branche relativement récente et en plein développement de l'instrumentation astronomique. Cet article a pour objectif d'en donner une description globale sans entrer dans des détails techniques trop complexes.*

### 1- Aberrances causées par les turbulences atmosphériques

En 1666 Isaac Newton mit en pratique le principe du télescope réflectif décrit pour la première fois trois ans plus tôt par l'écosais James Gregory. Il utilisait

alors un miroir en bronze de 2,5 cm de diamètre. Aujourd'hui le diamètre des plus grands télescopes dépasse les 10 m. Cette augmentation de taille a une raison simple : la résolution maximale que peut atteindre un télescope dépend de son ouverture. Plus un télescope est de grande dimension, plus sa résolution est élevée. Ainsi un télescope de 10 mètres de diamètre a un pouvoir de résolution théorique d'environ 0.015 secondes d'arc (soit  $4,16 \times 10^{-6}$  degrés). Cette limite théorique suppose de disposer d'un instrument « parfait », sans défaut susceptible de diminuer sa résolution. Cependant, même un instrument idéal ne peut fournir des observations à la résolution maximale en raison de la turbulence atmosphérique qui « floute » les images. Les plus grands télescopes, tels les deux télescopes Keck à Hawaii de 10 m de diamètre (Fig. 1), ont une résolution équivalente à un télescope de 20

cm si on ne corrige pas les effets de la turbulence atmosphérique. Les observateurs se trouvent donc confrontés à un problème majeur : à quoi bon développer des instruments de plus en plus perfectionnés si leurs performances sont limitées par les conditions d'observations au sol ?

Avant de parvenir jusqu'au télescope, la lumière traverse l'atmosphère terrestre. Or, celle-ci n'est pas homogène. Les masses d'air qui la composent ont des densités et des températures variables. Ces inhomogénéités perturbent le parcours de la lumière ce qui altère les observations effectuée au sol. Des masses d'air ayant des densités différentes possèdent des indices de réfraction différente. L'indice de réfraction mesure le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. On peut faire l'analogie entre les ondes lumineuses et les vagues



Figure, 1 : Les deux télescopes Keck sur le Mauna Kea à Hawaii © Xavier M. Jubier

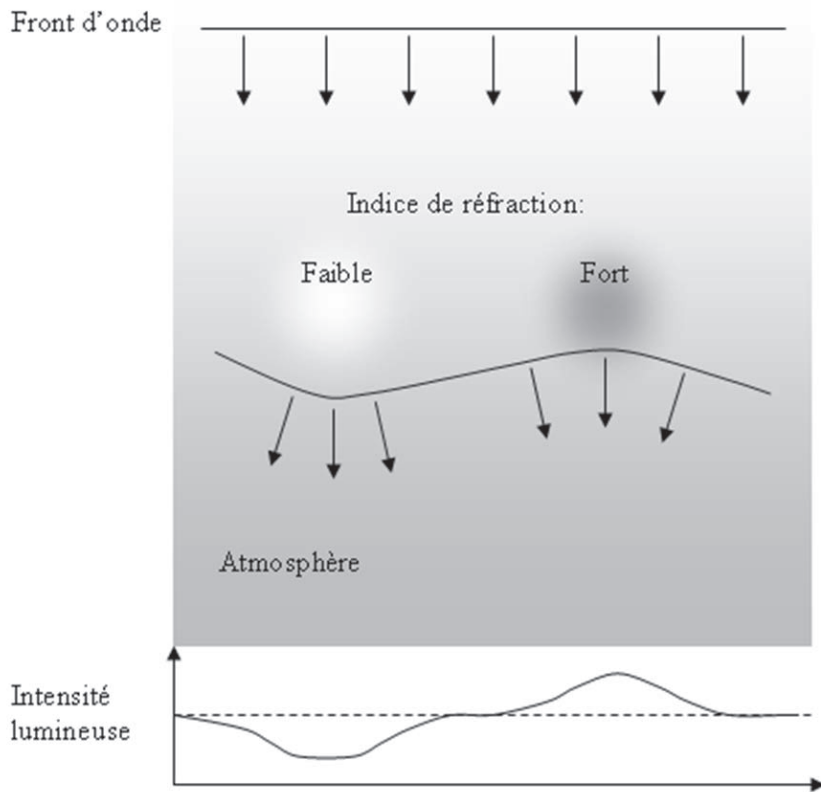


Figure 2 : Représentation schématique de la déformation du front d'onde lorsque la lumière d'une étoile traverse l'atmosphère. La courbe du bas représente la variation d'intensité lumineuse qui en résulte

créées à la surface d'un plan d'eau dans lequel on aurait jeté un objet. Le front d'onde pour une onde lumineuse est alors l'équivalent de la crête des vagues. Lorsque la lumière provient d'une source lointaine, comme c'est le cas pour les objets observés avec un télescope, le front d'onde forme un plan. Tant qu'il n'y a pas de perturbations, les fronts d'ondes se déplacent tous à la même vitesse et ont une forme régulière. En traversant l'atmosphère où l'indice de réfraction est inhomogène, la vitesse de propagation du front d'onde n'est plus uniforme. Certaines parties du front d'onde

sont plus ralenties que d'autres, celui-ci se déforme et devient ondulée (Fig. 2). L'information sur la position exacte et l'intensité de la source de l'onde lumineuse est alors altérée. On peut différencier deux types de perturbations liées à ce phénomène: les interférences et les effets géométriques.

Les interférences sont à l'origine de la scintillation des étoiles lorsqu'on les observe à l'œil nu. Cependant, ces interférences créent des perturbations à petite échelle (typiquement de l'ordre de grandeur de la taille de l'œil) et s'annulent en moyenne pour

des systèmes d'observations de plus grande taille comme les télescopes. C'est pourquoi nous les laisseront de côté dans cet article. Pour les lecteurs intéressés, ce phénomène est décrit en détail dans un article sur la scintillation des étoiles publié dans le précédent numéro de Ciel & Terre (1).

Les modifications de la vitesse de propagation du front d'onde par les inhomogénéités atmosphériques peuvent avoir pour conséquence un changement de sa direction de propagation. C'est ce que l'on nomme ici les effets géométriques. Lorsque l'indice de réfraction varie, les rayons lumineux peuvent être déviés, c'est sur ce phénomène que repose le principe des lentilles (Fig. 3). Le verre des lentilles possède un indice de réfraction supérieur à celui de l'air. En fonction de la courbe de la lentille, celle-ci peut concentrer les rayons lumineux (lentille convergente) ou au contraire les faire diverger (lentille divergente). Si l'interface entre deux milieux possédant deux indices de réfraction différents est plane, alors la position de la source lumineuse vue par l'observateur semblera différente de sa position réelle. C'est ce qui arrive lorsqu'on regarde un poisson à travers la surface de l'eau. Similairement, les perturbations atmosphériques peuvent produire deux types d'effets sur l'image d'un astre : soit modifier sa position apparente, c'est ce que l'on nomme l'agitation, soit faire varier son intensité en concentrant ou diluant la lumière (effet de

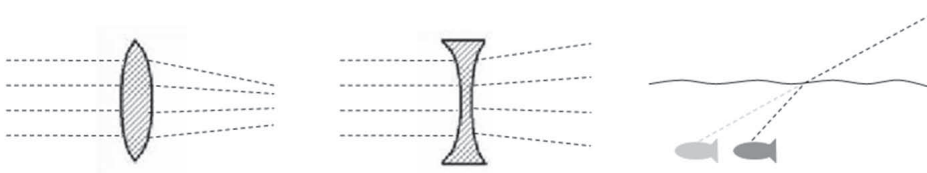


Figure 3 : Déviation des rayons lumineux. A gauche : lentille convergente. Au centre : lentille divergente. A droite : réfraction à la surface d'un plan d'eau.

## Optique adaptative et ophtalmologie

Les techniques d'optique adaptative ne sont pas réservées à l'astronomie.

On utilise aussi l'optique adaptative en ophtalmologie pour imager de façon précise le fond de l'œil. En effet, pour observer la rétine il faut regarder à travers des milieux plus ou moins transparents et homogènes (cornée, cristallin, humeur vitrée...). Tout comme l'atmosphère perturbe les observations en astrophysique, ces différents milieux dégradent la qualité des images de la rétine.

Les techniques d'optique adaptative, tout d'abord développées pour l'astrophysique, ont été adaptées à l'ophtalmologie afin d'atténuer ce problème. Le fond d'œil traditionnel ne permet pas de distinguer les différentes cellules de la rétine (les bâtonnets et les cônes). En compensant en temps réel les défauts de l'œil, l'optique adaptative permet d'arriver à une telle résolution.

A la fin des années 1990, l'américain David Williams a pour la première fois produit une image d'une rétine vivante à l'échelle cellulaire en adaptant la technique de l'optique adaptative à l'œil. En 1998, le projet ŒIL coordonné par François Lacombe, astronome à l'Observatoire de Paris fut lancé pour développer un instrument utilisable par les ophtalmologistes. Aujourd'hui les premiers appareils utilisant cette technique commencent à être commercialisés. Cela devrait permettre à terme de diagnostiquer précocement de nombreuses maladies rétinienne.

lentille convergente ou divergente), c'est ce que l'on nomme la scintillation.

Le seul moyen de s'affranchir complètement des perturbations atmosphériques est d'observer depuis l'espace comme le fait le satellite Hubble depuis plus de 20 ans. Cependant, les contraintes budgétaires, de dimensions, de maintenance (5 vols de navette spatiale ont été dédiés à l'entretien de Hubble pour un coût... astronomique !) et le manque de flexibilité liés à l'observation depuis l'espace font que nous ne pouvons pas nous passer des télescopes au sol.

Sur Terre, certaines régions sont plus favorables que d'autre pour les observations. Il s'agit de régions situées à haute altitude, là où la couche d'atmosphère est plus fine, et de préférence où celle-ci est la plus calme possible (sommets isolés, régions très sèches...). Newton l'avait déjà compris lorsqu'il proposait en 1704 dans *Opticks* de placer les télescopes dans des lieux où l'air est « *calme et serein, tel celui qu'on respire sur le sommet des montagnes*

*élevées au-dessus de la région des vapeurs grossières* ». Le site réputé pour offrir les meilleures conditions d'observation est l'observatoire de Mauna Kea à Hawaii situé à une altitude de 4205 m. Le désert de l'Atacama au Chili offre aussi des conditions d'observations exceptionnelles. De nombreux observatoires y sont installés tels l'observatoire européen ESO (European Southern Observatory) sur plusieurs sites : La Silla à 2400 m d'altitude ou encore Cerro Paranal à 2635 m d'altitude qui héberge le Very Large Telescope, un ensemble de 4 télescopes de 8.2 m de diamètre. Malgré tout même sur ces sites les turbulences atmosphériques, bien que plus faibles, perturbent encore fortement les observations.

### 2- L'optique adaptative

C'est en 1953 que W. Babcock (2) proposa un concept visant à compenser l'effet des turbulences atmosphériques en agissant activement sur les télescopes. Ce furent les débuts d'une nouvelle technique qui allait révolution-

ner l'instrumentation astronomique : l'optique adaptative. On peut définir l'optique adaptative comme un dispositif optoélectronique, c'est à dire combinant des dispositifs optiques et électroniques, visant à corriger les effets de la turbulence atmosphérique sur les images des télescopes terrestres. De part la complexité de cette technique et le coût liée à sa mise en œuvre, les premières applications liées à l'astronomie scientifique n'ont vu le jour qu'au milieu des années 1970 avec les réalisations de Buffington et ses collaborateurs (3). L'optique adaptative a pris son essor dans les années 1980 lorsque les technologies nécessaires (caméras, ordinateurs et miroirs déformables rapides) commencèrent à être maîtrisées. Depuis les années 1990, tous les grands télescopes en sont équipés.

Le miroir d'un télescope réfléchit les ondes lumineuses vers un détecteur ou se forme l'image. Si elles ont été perturbées au cours de leur trajet, il ne sera pas possible de restituer la position et l'intensité exacte de la source lumineuse et l'image sera de mau-

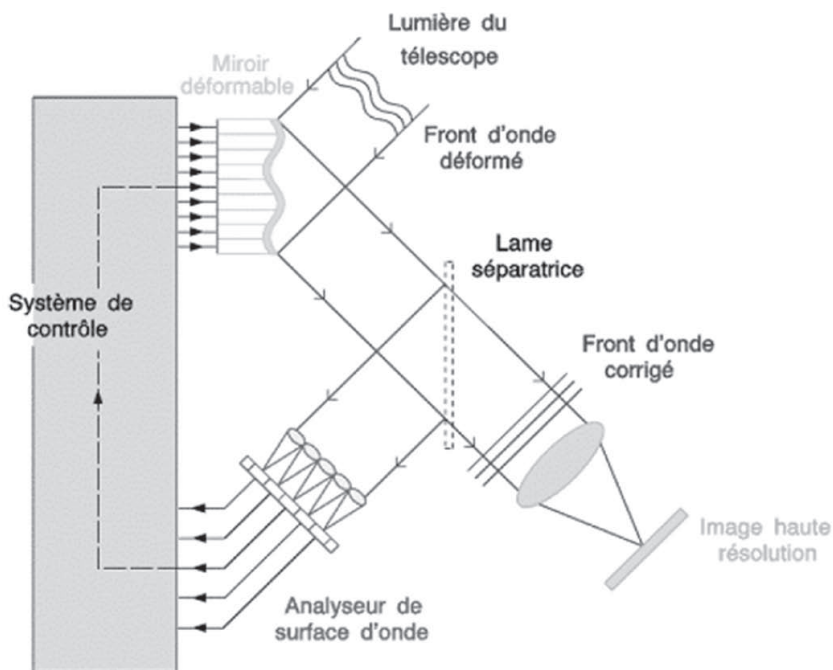


Figure 4 : Schémas fonctionnel d'un système d'optique adaptative. Crédits : Lawrence National Laboratory and NSF Center for Adaptive Optics

vaise qualité. Le principe de l'optique adaptative est de mesurer les perturbations du front d'onde causées par la turbulence atmosphérique afin d'adapter la géométrie du miroir du télescope pour les compenser. Le front d'onde mesuré par le détecteur est alors corrigé de l'effet des turbulences atmosphériques ce qui permet d'améliorer la qualité des images. La figure 4 montre une représentation schématique d'un système d'optique adaptative. Il y a trois phases principales dans sa mise en pratique.

La première consiste à se donner une source lumineuse de référen-

ce dont la position et l'intensité sont parfaitement connues afin de mesurer les perturbations du front d'onde. Cette source doit être située à proximité de l'objet que l'on souhaite observer afin que la lumière provenant de l'objet de référence et de l'objet à imager aie traversé la même région de l'atmosphère et donc subit les mêmes perturbations. Cela limite le champ de vue où la correction est appliquée à moins de 2" d'arc autour de l'objet de référence (soit environ  $5.6 \times 10^{-4}$  degrés). On peut utiliser comme source lumineuse de référence des étoiles dont on connaît exactement la position et la lumino-

sité. Encore faut-il disposer d'une étoile de ce type à proximité de l'objet à étudier, ce qui n'est pas toujours le cas. Une solution à ce problème fut proposée dans les années 1980 : tout simplement créer une étoile artificielle ! Pour cela on utilise un laser que l'on pointe à proximité de l'étoile à observer. Les plus couramment utilisés sont de couleur jaune. Cette couleur est choisie car elle permet d'interagir spécifiquement avec les atomes de sodium. Il existe en effet une fine couche d'atomes de sodium dans la haute atmosphère aux alentours de 100 km d'altitude. Quand le faisceau laser rencontre les atomes de sodium il les « excite » et ceux-ci émettent de la lumière. Comme on connaît précisément la direction dans laquelle on pointe le laser et l'altitude de la couche de sodium, on parvient à créer une étoile artificielle dont on connaît exactement la position et l'intensité.

La seconde phase consiste à analyser les déformations qu'a subit le front d'onde en provenance de la source lumineuse de référence. Pour cela on isole une partie du signal lumineux réfléchi par le miroir du télescope à l'aide d'une lame séparatrice et on l'envoie sur un analyseur de front d'onde. Comme son nom l'indique celui-ci va analyser les déformations du front d'onde. Nous n'entreront pas plus loin dans sa description car il s'agit d'un système relativement complexe. L'important

#### Références :

- (1) La scintillation des étoiles, A. Merlaud et R. Maggiolo, Ciel & Terre, Juin 2011
- (2) Babcock H. W. Proc. Astron. Soc. Pac. 65 : 229, 1953
- (3) Buffington, A., Crawford, F. S., Muller, R. A., Scemin, A. J., Sits, R. G., J. Opt. Soc. Am. 67: 298-303, 1977.
- (4) A Powerful Innovative Adaptive-Optics Technology To Survey the Early Universe", Paris Observatory and CNRS Press Release, 17 December 2010.

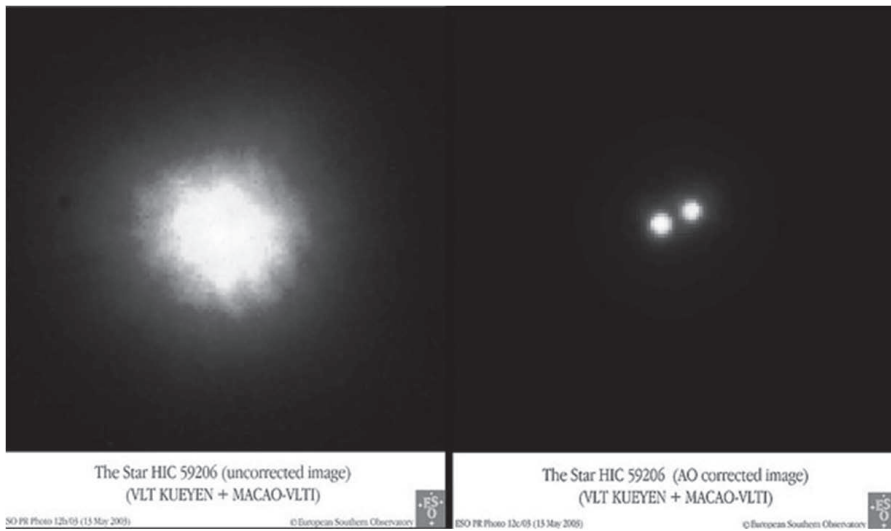


Figure 5 : Image du système binaire HIC 59206 prise par le VLT. A gauche : image non corrigée, on ne distingue qu'une tache diffuse. A droite : image corrigée par un système d'optique adaptative, on distingue alors les deux étoiles formant ce système binaire. Crédits : ESO

est de retenir son rôle : utiliser le signal optique qu'il reçoit pour mesurer les perturbations du front d'onde.

Cette information est ensuite envoyée vers un système électronique : le système de contrôle. Il a pour but de modifier la forme du miroir du télescope afin de corriger les déformations du front d'onde. Le principe du système de contrôle est assez simple. Imaginons une partie du front d'onde qui a traversé une région de l'atmosphère où l'indice de réfraction est élevé et donc où la vitesse de propagation faible. Cette partie du front d'onde est en retard par rapport au plan formé par le front d'onde avant qu'il ne soit déformé par l'atmosphère. Il s'agit de lui faire rattraper son retard pour redresser le front d'onde avant que celui-ci n'atteigne le détecteur où se forme l'image. Pour cela, le contrôleur commande des vérins qui vont déformer le miroir du télescope en le rapprochant légèrement du détecteur. Ce faisant on diminue le chemin optique entre le détecteur la région du miroir où se réfléchit la partie en retard du front d'onde.

A l'inverse, pour une partie du front d'onde en avance, on va utiliser un vérin pour éloigner du détecteur la partie correspondante du miroir. Plus le nombre de vérins est grand et plus la correction est précise. De nos jours, les systèmes d'optique adaptative les plus avancés peuvent en compter plus d'un millier.

Une des principales difficultés de l'optique adaptative tient au fait que les turbulences atmosphériques sont fortement variables dans le temps. Il est par conséquent nécessaire de réajuster en permanence la correction appliquée sur le miroir. Comme on peut le remarquer sur la Figure 4, l'analyseur de front d'onde ne mesure pas directement la lumière pénétrant dans le télescope mais plutôt la lumière réfléchi par le miroir déformable du télescope, après correction du front d'onde. Lorsque les turbulences atmosphériques évoluent, il détecte des imperfections dans le front d'onde corrigé et transmet au système de contrôle l'ordre de réajuster la géométrie du miroir afin de les corriger. Le système travaille donc en boucle, c'est

ce que l'on nomme une rétroaction. Ce sont les caractéristiques du front d'onde après correction qui conditionnent les caractéristiques de la correction effectuée à l'instant suivant. Cette rétroaction doit s'effectuer quasiment en temps réel du fait de la forte variabilité des turbulences atmosphériques.

L'optique adaptative est un domaine en constant développement pour lequel la recherche est très active. Régulièrement des améliorations sont proposées. Citons par exemple les récents travaux d'une équipe franco-britannique qui vient mettre au point une nouvelle technique, appelée optique adaptative multi-objet (4). Habituellement, on utilise une seule étoile comme référence. On mesure alors les perturbations du front d'onde dans une seule direction. Avec cette technique, il est possible d'utiliser plusieurs étoiles comme références ce qui permet d'explorer un champ de vue plus de 10 fois supérieur à celui disponible jusqu'à présent.

L'optique adaptative est un élément fondamental de l'astronomie actuelle. Elle a nettement amélioré les capacités des télescopes terrestres (voir Fig. 5). Grâce à elle, ils peuvent maintenant rivaliser avec les télescopes spatiaux et ce pour un coût moindre et avec une plus grande flexibilité.

