

## L'optique adaptative des télescopes modernes<sup>1</sup>

Gaston Fischer, Peseux / Suisse, gfischer (at) vtx.ch

### Pourquoi les étoiles scintillent-elles ?

Même si certains d'entre nous ont de la peine à le vérifier, nous avons tous appris que l'on peut, dans le ciel nocturne, distinguer les planètes des étoiles. Les planètes sont des objets proches qui ne sont pas eux-mêmes lumineux, mais qui réfléchissent l'éclat du Soleil comme le fait la Lune. Cette lumière nous parvient après un voyage de quelques dizaines, voire une centaine de minutes (pour la Lune ce temps n'est que d'un peu plus d'une seconde, mais atteint 40 minutes environ pour Jupiter et 80 pour Saturne).

Avec de bonnes jumelles on peut aussi voir l'apparence et les dimensions angulaires de planètes telles que Vénus, Mars et Jupiter. Les faisceaux de lumière que nous recevons de ces planètes ont donc la forme de cônes tronqués, dont les grandes bases ont les dimensions des planètes, alors que les petites bases des sommets n'ont que l'extension de nos pupilles oculaires. Dans son parcours à travers l'atmosphère la lumière rencontre des zones où la température et l'humidité de l'air varient rapidement, et ces zones ne sont pas stables, étant continuellement brassées par les vents. Cela perturbe la progression régulière des fronts d'onde par de multiples réfractions et l'image des planètes s'en trouve brouillée. Mais vu la grandeur apparente des planètes, seule une faible proportion de la lumière s'échappe ou entre dans les cônes que nous venons de décrire, de sorte que l'image des planètes reste tout de même plutôt stable pour nos yeux.

Il en va tout autrement pour les étoiles, qui sont elles-mêmes des soleils, chacune avec son éclat propre. Mais les étoiles sont si éloignées que leur lumière ne nous parvient qu'après un voyage de plusieurs années : plus de quatre ans pour l'étoile la plus proche, Proxima dans la constellation du Centaure, et jusqu'à des dizaines de milliers d'années pour certaines. Même pour les meilleurs télescopes optiques elles ne se manifestent guère que comme de tout petits points lumineux, raison pour laquelle on parle généralement de sources ponctuelles. Lorsqu'ils arrivent au voisinage de la Terre les faisceaux de lumière des étoiles qui sont captés par nos pupilles sont donc des filets extrêmement fins et le brassage atmosphérique a pour effet que le plan des fronts d'onde qui vient sur nos pupilles varie continuellement d'orientation. Ce qui fait scintiller les étoiles sont précisément ces variations continues et imprévisibles du plan des fronts d'onde perçus par nos pupilles.

Ce scintillement déforme d'ailleurs l'image de tout objet observé à travers une importante couche d'air libre. Même l'image des planètes s'en trouve dégradée et il y a donc une limite à la grandeur des télescopes optiques, au-delà de laquelle on ne gagne plus rien en netteté ou résolution. Avec ses 10 m de diamètre, le plus grand télescope optique actuel, celui du Mont Palomar près de San Diego en Californie, n'a qu'une résolution d'une demi seconde d'arc en lumière visible, alors que sans les perturbations atmosphériques on devrait pouvoir faire 50 fois mieux. C'est bien pour cette raison que les Américains ont mis en orbite, sur un satellite artificiel, le télescope de Hubble et son fameux miroir de 2,4 m. Ce télescope, dont le miroir principal avait été mal taillé, a heureusement pu être sauvé. La réparation, effectuée par une équipe de la navette spatiale dans laquelle l'astronaute suisse Claude Nicollier était aux commandes du grand bras manipulateur, a pleinement réussi. Mais les télescopes en orbite ne pourront pas tout faire et ils sont très coûteux, autant à la construction, au lancement, qu'à

---

<sup>1</sup> Une première version de cet article a été publiée dans ORION 262, juin 1994, pp. 131-134.

l'entretien. Il n'est donc pas question de renoncer à améliorer les instruments dont on dispose sur terre ferme, surtout si cela est possible à moindre frais.

## L'optique adaptative

En France comme aux Etats-Unis les astronomes ont imaginé une méthode raffinée pour contrecarrer le scintillement atmosphérique. Cette méthode est basée sur l'utilisation, dans les télescopes, d'un miroir déformable et requiert, dans le champ de l'objet que l'on veut étudier, la présence d'une étoile brillante, appelée "étoile-guide". A cause du scintillement l'image de cette étoile-guide est dégradée, elle est surtout agrandie et l'énergie lumineuse est dispersée sur une grande surface, comme si l'image était "défocalisée".

La technique d'amélioration imaginée par les astronomes est celle de l'optique adaptative, illustrée à la Fig. 1. Dans cette technique une partie du faisceau incident est déviée sur un analyseur, constitué d'un grand nombre de détecteurs sectoriels. L'image de l'étoile brillante est ainsi décomposée en de multiples signaux, au moyen desquels on peut déterminer un ensemble de corrections, qu'on applique à un miroir déformable afin de compenser les effets du scintillement atmosphérique. Dans les premiers essais on appliquait ces corrections au miroir principal. Maintenant on les porte sur un miroir secondaire, beaucoup plus petit. En général ce miroir déformable est constitué d'un réflecteur très mince, au dos duquel est fixé un ensemble de vérins ou correcteurs piézo-électriques qui permettent de déformer le miroir. Une fois les ajustements réalisés, l'étoile-guide et l'objet d'étude moins lumineux, apparaissent pendant un très court instant comme s'il n'y avait pas de perturbations atmosphériques. Les plages de lumière sont fortement concentrées et les objets d'étude apparaissent avec une beaucoup plus grande netteté. La Fig. 2 en donne deux exemples. Avant que la vision de l'astronome ne soit à nouveau brouillée, il faut recommencer toute l'opération de correction. Mais avec les moyens électroniques dont on dispose aujourd'hui cela ne pose pas de problèmes insurmontables.

A la place d'un réflecteur très mince et facile à déformer, on peut aussi utiliser un miroir constitué de nombreux segments indépendants, dont on peut orienter chacun de façon individuelle. Mais cette méthode s'est avérée être plus difficile à mettre en œuvre. Le fait que les miroirs sont indépendants les uns des autres a pour conséquence que de multiples et fréquentes calibrations sont nécessaires, pour assurer une bonne corrélation des corrections que chaque miroir apporte au tout. Avec un miroir mince unique, auquel on a déjà donné une forme initiale appropriée, la corrélation entre les zones corrigées est acquise d'avance.

Les déformations qu'il faut apporter au miroir correcteur sont de l'ordre de 10 microns ( $\mu$ ), mais la précision nécessaire est du cinquantième de  $\mu$ . Dans le domaine de la lumière visible le rayon moyen des faisceaux lumineux qu'il faut dévier est de l'ordre de 5 à 15 cm. Un télescope d'amateur, dont le diamètre est généralement de cet ordre, a donc un pouvoir de résolution bien supérieur aux télescopes géants non corrigés; mais les grands télescopes surpassent les petits par une luminosité beaucoup plus grande. Dans l'infrarouge, p. ex. à 2  $\mu$  de longueur d'onde, les rayons des faisceaux à corriger avoisinent les 50 cm. Pour un télescope de 4 m de diamètre il faudra donc environ 60 vérins correcteurs, alors que dans le visible il en faudrait au minimum 500 à 1000, raison pour laquelle les premiers essais ont tous été faits dans l'infrarouge.

Une limitation sérieuse à la correction par optique adaptative est qu'elle n'est efficace que sur une plage angulaire d'environ 5" (5 secondes d'arc) dans le visible. Mais le disque de Jupiter sous-tend déjà un angle de 40" lorsqu'il est vu depuis la Terre et l'optique adaptative n'est donc pas appropriée pour son observation. Ce problème de l'étendue de la plage d'observation est le défi majeur que la nouvelle technique doit encore résoudre. Dans l'infrarouge l'étendue de la plage corrigée est plus grande et sur cet angle plus grand les déformations changent

moins rapidement. Ainsi la mise en œuvre de la méthode d'optique adaptative est une fois encore plus facile à réaliser aux grandes qu'aux petites longueurs d'ondes.

Une autre difficulté que la méthode de l'optique adaptative doit surmonter est la nécessité d'une étoile brillante située au voisinage immédiat de tout objet intéressant qu'on désire étudier. En effet, pour qu'une étoile connue puisse jouer le rôle d'étoile-guide, il faut que sa magnitude ne dépasse pas la valeur de 10 (il vaut peut-être la peine de rappeler que pour chaque unité de magnitude la luminosité d'une étoile est environ **deux fois et demi plus faible !**). Cela a conduit les astronomes à imaginer la création d'étoiles-guides artificielles. Mais la présence d'une étoile-guide réelle offre l'avantage d'une référence positionnelle, puisqu'on connaît presque toujours ses coordonnées avec précision, ce qui n'est pas le cas pour les étoiles-guides artificielles.

## La guerre des étoiles

Le scintillement atmosphérique perturbait aussi le système de défense américain, connu sous le sigle d'**IDS** (Initiative de Défense Stratégique, ou plus prosaïquement guerre des étoiles). Autant pour repérer les missiles adverses que pour les détruire par un intense faisceau laser, il fallait éviter au maximum la diffusion des faisceaux. Avec plusieurs années d'avance les experts **IDS** étaient ainsi arrivés à la même idée que les astronomes, soit la mise en œuvre d'une optique adaptative, et ils avaient déjà réalisé de grands progrès dans sa réalisation pratique.

Pour l'armée américaine l'optique adaptative avait deux buts précis mais distincts. Le premier était de pouvoir mieux identifier les nombreux satellites, en particulier les satellites espions, mis en orbite par l'URSS. En effet, si on peut, sans optique adaptative, localiser et suivre un satellite, on ne peut pas identifier ses caractéristiques. Cela devient possible avec la nouvelle technique, comme le suggère l'exemple du télescope de Hubble dans la Fig. 2. Le deuxième objectif était celui de l'**IDS**. Il fallait d'abord repérer tout missile offensif et ensuite le détruire par un super-puissant rayonnement laser. L'optique adaptative intervient dans les deux phases; d'abord celle qui consiste à repérer le missile incident; ensuite, il faut éviter que le faisceau laser envoyé pour détruire le missile ne soit défocalisé par le brassage atmosphérique. Pour ce faire on utilise le faisceau réfléchi par le missile lors de son repérage, comme s'il s'agissait de la lumière d'une étoile. Ce faisceau permet d'abord de corriger l'optique de réception pour bien identifier le missile, mais il est ensuite utilisé pour corriger l'optique d'émission du faisceau laser de destruction et assurer que toute l'énergie de ce faisceau vienne effectivement frapper le missile incident en vue de le détruire.

Les experts de la guerre des étoiles étaient parfaitement conscients que l'astronomie pourrait tirer un très grand profit de la technique de l'optique adaptative et dès que les relations est-ouest se sont améliorées, ils ont insisté auprès des instances militaires pour obtenir, et effectivement recevoir, la permission de rendre publics leurs travaux, c.-à-d. de les "déclassifier". Il était en effet évident que les astronomes américains et européens, en particulier ceux de l'**ESO** (European Southern Observatory, consortium d'états européens, dont la Suisse fait partie, qui exploite un grand observatoire au sommet de La Silla, au Chili, afin que l'Europe puisse aussi avoir accès au ciel de l'hémisphère sud), allaient de toute façon développer cette technique et que le maintien du secret militaire signifiait simplement un énorme gaspillage de moyens.

On pourrait maintenant demander s'il vaut vraiment la peine de mettre en œuvre la technique de l'optique adaptative vu que les télescopes en orbite, comme celui de Hubble, permettent de se soustraire au brassage atmosphérique ? La raison principale qui militent en faveur de l'amélioration des télescopes au sol est que malgré la complexité de l'optique adaptative, les télescopes traditionnels sont beaucoup moins coûteux à construire et à entretenir que les télescopes en orbite sur des satellites. Les télescopes en orbite ont l'avantage de pouvoir

travailler à des longueurs d'ondes auxquelles l'atmosphère est totalement opaque, comme p. ex. l'ultraviolet ou les rayons x, mais ceux au sol ont des apertures beaucoup plus grandes et surtout ils peuvent travailler en commun avec des lignes de base stables de grandes dimensions. Deux télescopes en orbite offriraient certes des lignes de base plus grandes, mais d'une part elles varient très rapidement et sont plus difficiles à déterminer avec précision. Le contrôle périodique des lignes de bases de télescopes en Europe et en Amérique a d'ailleurs permis de suivre l'ouverture de l'Atlantique, apportant ainsi une confirmation directe de la dérive des continents. En définitive, télescopes au sol et télescopes en orbite doivent être considérés comme des instruments complémentaires. Chacun de ces deux outils est particulièrement bien adapté pour certains domaines de travail et c'est dans ces domaines qu'il devrait de préférence être utilisé.

### Les étoiles-guides artificielles

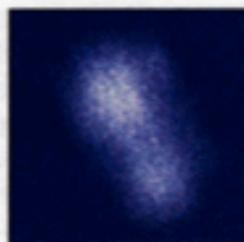
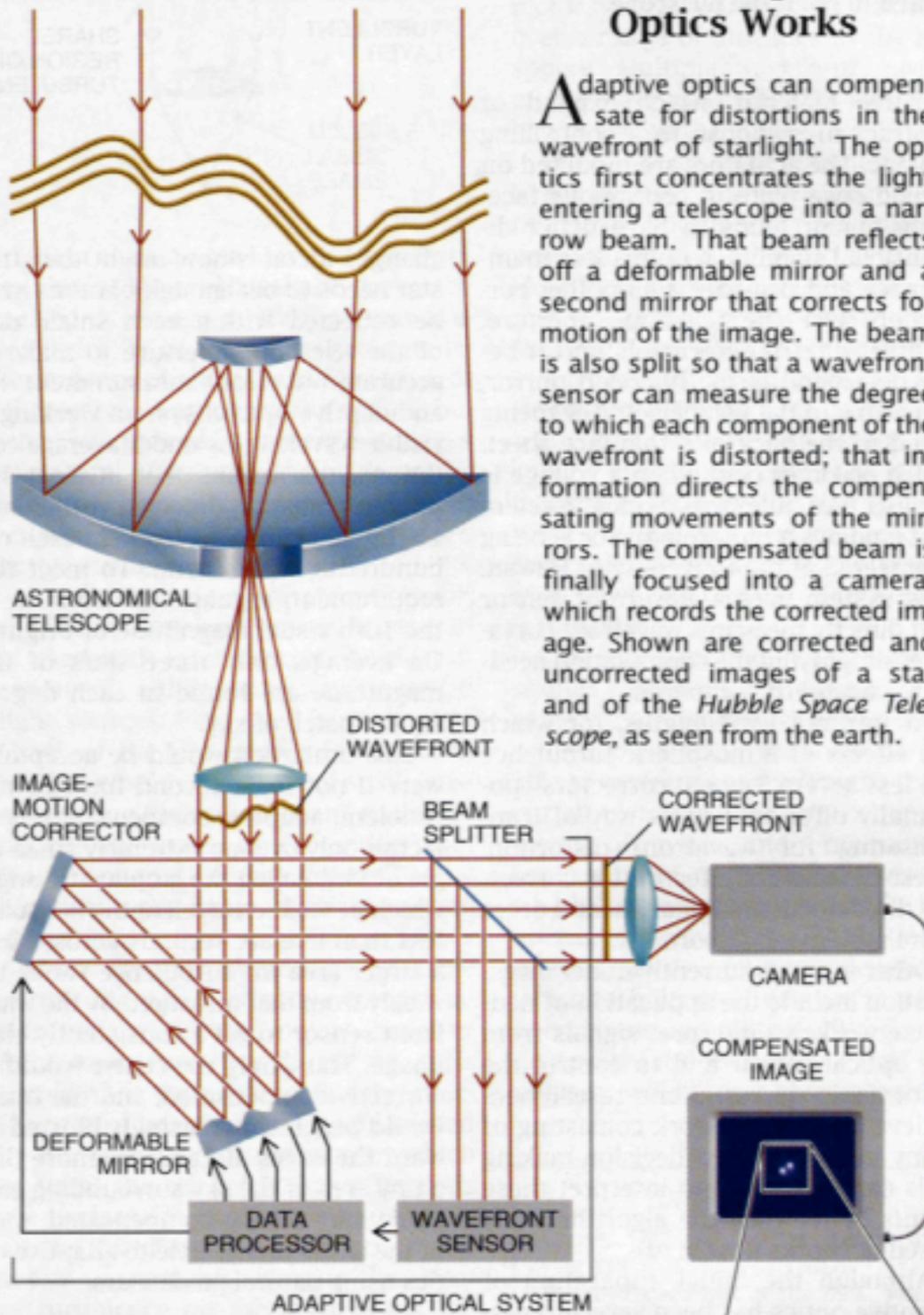
En quoi consiste la méthode de l'étoile-guide artificielle ? Dans une zone au haut de la mésosphère, aux alentours de 90 à 100 km d'altitude, se trouve une concentration relativement grande d'atomes de sodium, on parle même d'une "couche de sodium". Par une puissante impulsion de rayonnement laser, à une longueur d'onde appropriée et envoyée par le télescope pour assurer un très mince filet de lumière, on excite les atomes de la couche de sodium situés dans ce rayon. Les atomes ainsi excités retournent immédiatement à l'état fondamental, émettant par fluorescence un éclair d'intense lumière jaune, caractéristique des fameuses lampes au sodium. Vu depuis le télescope cet éclair apparaît comme une étoile ponctuelle, lumineuse pendant un temps très court, suffisamment long cependant pour permettre la compensation des perturbations atmosphériques, comme nous l'avons décrit plus haut. Tout le processus doit se dérouler selon la rigoureuse séquence : envoi d'une impulsion laser, détection de l'étoile-guide par le réseau des capteurs sectoriels, déformation du miroir du télescope et, finalement, observation de l'objet d'étude, puis le cycle doit reprendre aussitôt. Le tout fonctionne à une cadence typique de l'ordre de mille cycles par seconde. Comparé à ce qui serait nécessaire pour la guerre des étoiles ce rythme est très lent; en effet, la vitesse des missiles dépasse de beaucoup celle des vents dans les perturbations atmosphériques.

Avec cette technique on est certain d'obtenir des images aussi bonnes, voire meilleures, qu'avec le télescope de Hubble et l'on est même persuadé que l'on pourra bientôt observer des planètes en orbite autour d'autres étoiles que notre Soleil.

**Fig. 1.** Représentation schématique du principe de l'optique adaptative. Le rayon incident de l'étoile-guide est analysé par le capteur du front d'onde (wavefront sensor) qui calcule les déformations à apporter au miroir correcteur. Ces dernières sont alors appliquées au miroir déformable. Dès que le miroir secondaire (image motion corrector) perçoit un signal bien focalisé de l'étoile-guide, c'est l'objet d'étude qui est visé et la camera est ouverte. L'image est alors enregistrée puis la camera se referme et tout le processus recommence.

## How Adaptive Optics Works

Adaptive optics can compensate for distortions in the wavefront of starlight. The optics first concentrates the light entering a telescope into a narrow beam. That beam reflects off a deformable mirror and a second mirror that corrects for motion of the image. The beam is also split so that a wavefront sensor can measure the degree to which each component of the wavefront is distorted; that information directs the compensating movements of the mirrors. The compensated beam is finally focused into a camera, which records the corrected image. Shown are corrected and uncorrected images of a star and of the *Hubble Space Telescope*, as seen from the earth.



HUBBLE UNCOMPENSATED



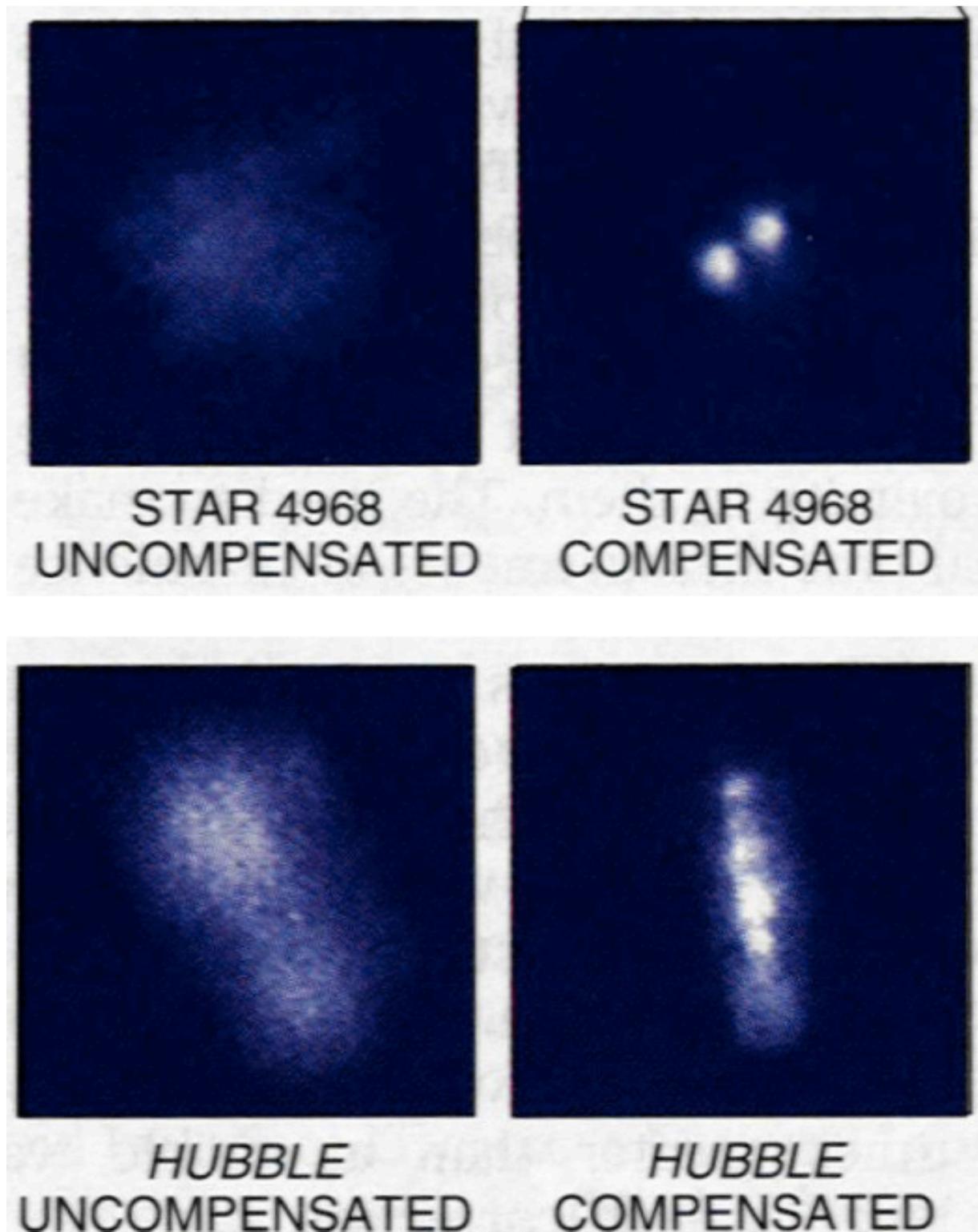
HUBBLE COMPENSATED



STAR 4968 UNCOMPENSATED



STAR 4968 COMPENSATED



**Fig. 2.** Images de l'étoile double **4968** (en haut) et du télescope de Hubble en orbite autour de la Terre (en bas), obtenues sans et avec correction par optique adaptative. En concentrant la lumière des objets visés la correction entraîne aussi une augmentation appréciable de leur luminosité. Elle permet ainsi l'observation de sujets de magnitude toujours plus grande. L'exemple proposé ici pour le télescope de Hubble est loin d'atteindre la netteté qui est possible avec les moyens dont disposent les spécialistes américains de la guerre des étoiles, qui ne vont pas dévoiler ce qu'ils arrivent effectivement à faire. (ces clichés sont reproduits d'un article de John W. Hardy, *Adaptive Optics*, Scientific American, June 1994, pp.40 – 45)