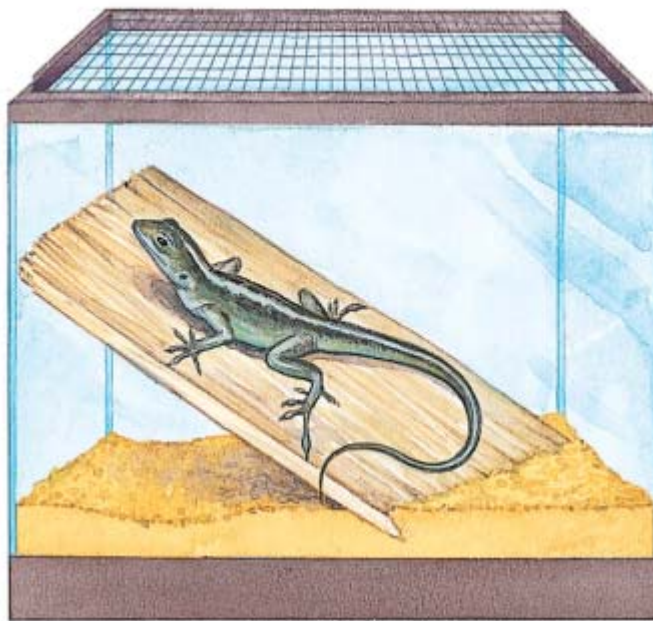
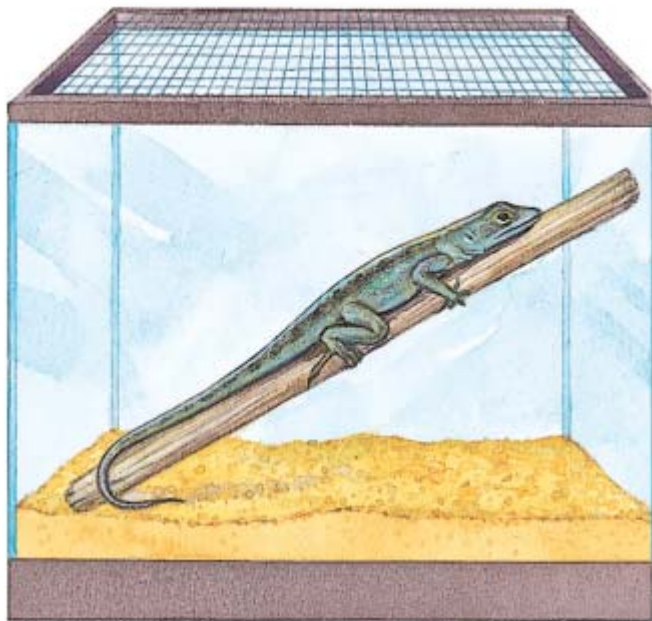




4. LA PLASTICITÉ PHÉNOTYPIQUE explique les différentes morphologies des lézards *Anolis sagrei* selon les supports sur lesquels ils se développent. Avec des perchoirs étroits, les pattes postérieures

des lézards sont plus courtes de quelques millimètres que celles des lézards qui se déplacent sur de larges planches (les dessins ne sont pas à la même échelle).

ancestraux qui aurait abouti à la spécialisation, on peut montrer qu'une telle concurrence existe entre les espèces actuelles. La comparaison de populations d'anoles bruns aux Bahamas montre que, dans les zones où cette espèce est la seule présente, elle se perche plus haut et occupe un nombre de sites plus importants que dans les zones où elle coexiste avec d'autres espèces d'anoles. La concurrence avec d'autres espèces, plus arboricoles, contraint peut-être l'anolé brun à réduire son habitat, mais on ne peut exclure que l'habitat lui-même diffère.

Des expériences sur le terrain nous ont aidé à répondre à cette question. Dans la forêt portoricaine humide, nous avons capturé et retiré de trois parcelles carrées de 20 mètres de côté tous les individus de l'espèce *Anolis gunlachi*, les lézards à longues pattes qui vivent à la base des arbres. Puis, nous avons mesuré la densité de population d'une seconde espèce, *Anolis evermanni*, l'anolé d'Evermann, spécialiste de la canopée. Après huit semaines, la densité de population d'*Anolis evermanni* était supérieure dans les parcelles d'où nous avons retiré *Anolis gunlachi* que dans les parcelles témoins où *Anolis gunlachi* avait été laissé.

Nous avons obtenu des résultats comparables en introduisant dans quelques îles minuscules des Bahamas sans lézards des populations d'*Anolis carolinensis*, l'anolé vert, qui vit dans la canopée. Nous avons alors comparé

son comportement, seul, par rapport à celui qu'il a dans les îles où il coexiste avec l'anolé brun : l'anolé vert se reproduit davantage quand il n'est pas en concurrence avec l'anolé brun. Tous les résultats confirment que les espèces qui vivent à proximité l'une de l'autre se nuisent.

Bien que d'autres mécanismes soient plausibles pour expliquer la spécialisation de l'habitat (par exemple, une espèce d'anoles pourrait être un prédateur pour une autre espèce), l'hypothèse la plus vraisemblable est que la concurrence pour les ressources alimentaires aboutit à la spécialisation de l'habitat (plus les interactions, telle la rivalité pour la nourriture, entre espèces sont fortes, plus ces espèces sont, écologiquement et morphologiquement, semblables).

À l'instar d'une enquête policière, les indices qui nous aident à percer les secrets de l'évolution existent, mais

aucun n'est décisif. En outre, dans le cas de lézards des Caraïbes, nous restons confrontés à une question : pourquoi diverses espèces se ressemblent-elles à ce point ? La pauvreté de ces îles – la biodiversité y est inférieure à celle des régions toutes proches d'Amérique centrale – est peut-être un élément de réponse. Les anoles se sont répandus dans des écosystèmes où les prédateurs et les compétiteurs étaient peu nombreux. Les environnements étant quasi identiques sur les différentes îles et les influences extérieures réduites, l'évolution a sans doute suivi les mêmes chemins en plusieurs endroits. C'est également le cas du groupe des poissons cichlidés dans les lacs de l'Afrique de l'Est.

Cependant, une telle convergence évolutive, en différents endroits, reste l'exception. Ce mystère de l'histoire naturelle reste... presque entier.

Jonathan LOSOS est professeur de biologie à l'Université de Washington

Jonathan LOSOS, Kenneth WARHEIT et Thomas SCHOENER, *Adaptive Differentiation Following Experimental Island Colonization in Anolis Lizards*, in *Nature*, vol. 387, pp. 70-73, mai 1997.

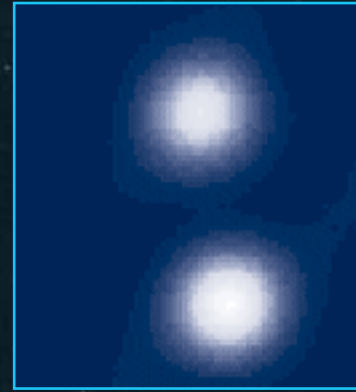
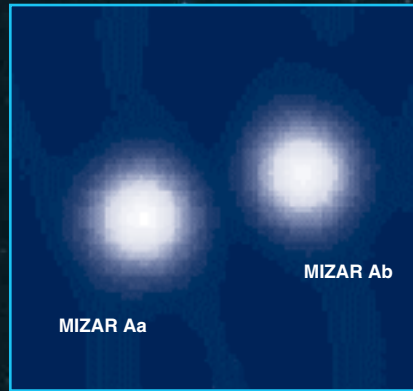
Duncan IRSCHICK et Jonathan LOSOS, *A Comparative Analysis of Ecological Significance of Maximal Locomotor Performance in Caribbean Anolis Lizards*, in *Evolution*, vol. 52, n° 1, pp. 219-226, février 1998.

Jonathan LOSOS, Todd JACKMAN, Allan LARSON, Kevin de QUEIROZ et Lourdes RODRÍGUEZ SHETTINO, *Contingency and Determinism in Replicated Adaptive Radiations of Island Lizards*, in *Science*, vol. 279, pp. 2115-2118, mars 1998.

Manuel LEAL, Javier RODRÍGUEZ-ROBLES et Jonathan LOSOS, *An Experimental Study of Interspecific Competition between two Puerto Rican Anolis Lizards*, in *Oecologia*, vol. 117, n° 1/2, pp. 273-278, novembre 1998.
<http://biosg.wustl.edu/~lososlab/>

La détection des étoiles

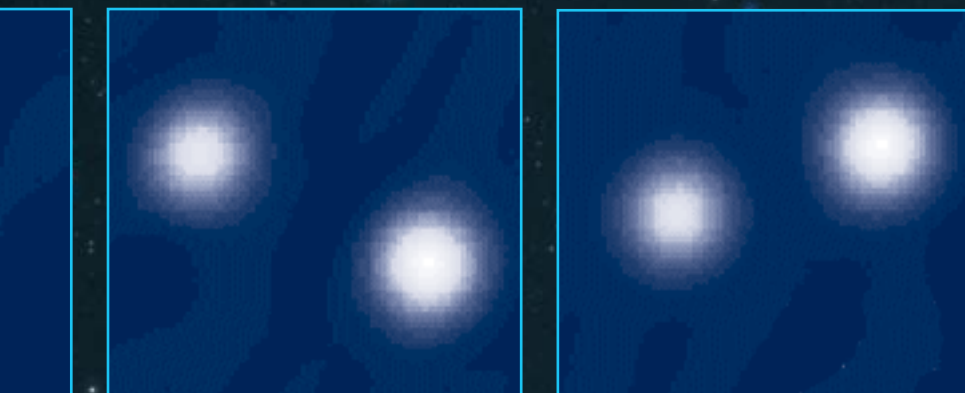
ALCOR
MIZAR



Malgré les turbulences atmosphériques, les nouveaux interféromètres optiques au sol révèlent cent fois plus de détails que le télescope spatial Hubble.

par interférométrie

ARSEN HAJIAN • THOMAS ARMSTRONG



1. Le premier système double jamais observé par un télescope classique fut Mizar, l'étoile du milieu de la queue de la Grande Ourse. Bien que les deux compagnes qui composent Mizar (Mizar A et Mizar B) soient séparées de moins de 0,004 degré sur la voûte céleste, chacune d'elles est aussi un système double. En 1996, le nouvel interféromètre optique NPOI a mis en évidence les deux étoiles qui constituent Mizar A, produisant à cette occasion une image dont la résolution dépassait tout ce qui avait été obtenu en astronomie optique jusqu'alors. Ces quatre images montrent Mizar Aa et Mizar Ab qui décrivent une demi-orbite autour de leur centre de gravité commun.

Observées à l'œil nu, les étoiles sont des points scintillants, et elles restent tout aussi petites quand on les observe à la jumelle. Même si certains astres géants pourraient englober le Système solaire d'un seul coup, aucune étoile n'est assez proche pour que nous la voyions autrement que sous la forme d'un point lumineux.

Aujourd'hui, grâce à l'interférométrie, une technique proposée il y a 130 ans, la résolution a été notablement améliorée, puisqu'à la place d'un point, on distingue un disque. Plutôt que d'observer le ciel avec des jumelles ou même avec un télescope, on a recours à un écran d'ordinateur relié à un dispositif nommé interféromètre optique. Depuis une cinquantaine d'années, les astronomes emploient avec succès ce type de dispositif dans le domaine des ondes radio ; ils ont ainsi mis en évidence la structure des galaxies lointaines et celle des quasars. Dans le domaine des longueurs d'onde visibles et infrarouges, il n'y a qu'une quinzaine d'années que les progrès techniques nécessaires ont été réalisés. Certes, le télescope spatial Hubble n'a pas son pareil pour photographier un objet peu lumineux, mais si l'étoile est brillante, les nouveaux interféromètres optiques au sol révèlent cent fois plus de détails que lui.

Aujourd'hui, l'interférométrie optique passe du rang de technique de laboratoire à celui de technique d'observation. Les interféromètres de dernière génération fourniront des images des systèmes à étoiles multiples, de la surface des étoiles, des enveloppes ou disques de matière en orbite autour d'étoiles, et même de l'ombre des planètes qui passent devant une étoile. D'ici peu, les astronomes disposeront d'un riche catalogue d'images d'un nouveau type, notamment des films où l'on verra des étoiles en rotation qui exhibent des taches stellaires (l'équivalent des taches solaires). Ainsi, nous comprendrons mieux la naissance des étoiles, leur structure, leur activité, leur évolution et leur mort.

Dans un interféromètre, deux signaux optiques presque identiques sont combinés pour produire des interférences, qui fournissent des informations inaccessibles avec un seul des

deux signaux. Ainsi, quand on combine les signaux reçus d'un même astre par deux télescopes distincts, on observe des franges sombres et brillantes. Les astronomes déduisent la structure spatiale de l'objet observé de l'espacement de ces franges et de la façon dont elles évoluent quand les télescopes sont déplacés. Ils obtiennent ainsi une bien meilleure résolution angulaire qu'avec une image unique de l'objet. Cette technique de cartographie d'un objet céleste est nommée interférométrie spatiale. Il existe d'autres types d'interférométrie, grâce auxquels les astronomes déterminent, par exemple, des caractéristiques comme le spectre lumineux d'un astre.

L'interférométrie spatiale dans le visible est une méthode de mesure complexe, qui nécessite des techniques de pointe, notamment sur le plan informatique. Tout d'abord, examinons comment fonctionnent les interféromètres, quels ont été les obstacles à surmonter pour les mettre au point, et quelles sont les observations que cette méthode rend aujourd'hui possibles.

L'atmosphère, une difficulté technique

Tout astronome désireux d'obtenir la photographie détaillée d'une étoile est confronté à deux difficultés : la taille limitée de son télescope et la turbulence de l'atmosphère terrestre. Considérons la question la plus élémentaire de l'astronomie : quelle est la taille apparente d'une étoile c'est-à-dire la dimension du disque qu'elle forme sur la voûte céleste ?

Lorsqu'elle est au plus près de la Terre, Vénus présente un diamètre apparent d'une minute d'angle, soit un soixantième de degré. Or, même pour l'œil humain le plus perçant, un tel disque ressemble à un point. En revanche, un télescope équipé d'un miroir de 15 centimètres est 60 fois plus efficace que l'œil nu, car son ouverture est bien supérieure à celle de la pupille. Dans un tel télescope, une étoile apparaît sous la forme d'un disque que le passage

de la lumière à travers l'ouverture a rendu flou ; son diamètre apparent est toujours de l'ordre de une seconde d'angle, quelle que soit sa taille réelle.

Pour concevoir les angles en jeu lorsque nous observons la voûte céleste, imaginons-nous qu'une seconde d'angle est à peu près l'angle sous lequel le gardien d'une équipe de football distingue un moucheron posé sur l'épaule du gardien de l'équipe adverse, ou encore l'angle

sous lequel nous observons le plus gros des satellites de Jupiter. À l'exception du Soleil, Bételgeuse est l'étoile dont le diamètre apparent est le plus grand dans le ciel. Comme ce dernier n'excède pas 60 millièmes de seconde d'angle, les diamètres apparents des autres étoiles ne mesurent, au mieux, que quelques millièmes de seconde.

Le pouvoir séparateur d'un télescope – sa capacité à distinguer deux

détails proches – augmente proportionnellement à son ouverture. C'est pourquoi les astronomes bâtissent des télescopes toujours plus grands. Ainsi, d'après les lois de l'optique, un télescope de 15 centimètres de diamètre permet l'observation d'un disque d'une seconde d'angle, et un télescope de 2,5 mètres celle de Bételgeuse. Les télescopes Keck de dix mètres installés au sommet du mont Mauna Kéa à Hawaïi devraient nous révéler les détails de la

Les contributions de l'interférométrie optique à l'astronomie

L'interférométrie optique a maintenant dépassé le stade de curiosité de laboratoire. Une vingtaine d'interféromètres optiques sont déjà en exploitation, certains depuis longtemps. Voilà quelques-uns des résultats obtenus.

L'étude des diamètres stellaires



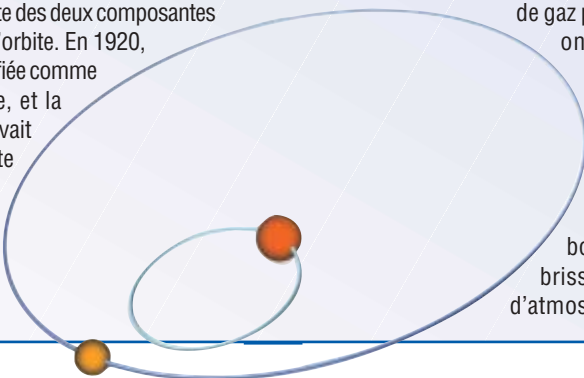
Les premiers diamètres stellaires ont été mesurés dans les années 1920 par Albert Michelson et Francis Pease. Ces deux pionniers ont évalué le diamètre de Bételgeuse ainsi que celui de cinq autres étoiles géantes dont le diamètre est compris entre 20 et

50 millisecondes d'angle. Si l'œil humain était doté d'un tel pouvoir séparateur, nous pourrions distinguer les atomes qui constituent un objet tenu à bout de bras !

Environ 50 ans plus tard, l'Australien Robert Hanbury Brown et son équipe ont mesuré, à l'aide de la technique de l'interférométrie d'intensité, 32 étoiles brillantes, dont le diamètre était compris entre 0,4 à 5,5 millisecondes d'angle. Aujourd'hui, les astronomes ont déterminé le diamètre de plus d'une centaine d'étoiles, avec une précision atteignant un pour cent dans le meilleur des cas. Seules quelques étoiles ont pu être mesurées par d'autres techniques, comme celle de l'occultation lunaire, c'est-à-dire d'après les informations tirées du passage de la Lune devant elles.

L'étude des orbites d'étoiles multiples

Plus de la moitié des systèmes stellaires sont constituées de deux étoiles (voire davantage) en orbite autour de leur centre de gravité commun. L'observation des orbites de ces étoiles doubles ou multiples est la seule façon de déterminer leur masse. En 1920, John Anderson de l'Observatoire du Mont Wilson, en Californie, a observé l'étoile binaire Capella à l'aide d'un interféromètre de Michelson de six mètres, et a mesuré la distance apparente des deux composantes stellaires en six points de l'orbite. En 1920, Capella était déjà bien identifiée comme étant un système binaire, et la vitesse des deux étoiles avait été mesurée sur leur orbite respective d'après des décalages Doppler mesurés dans leur spectre. Combinant ses résultats avec ces données spectroscopiques,



Anderson en a déduit l'inclinaison relative de l'orbite des deux étoiles composant Capella par rapport à notre ligne de visée ; il estima ainsi leurs masses et leur éloignement.

Les astronomes ont continué à mesurer des orbites binaires à l'aide d'interféromètres, et obtiennent une précision et une résolution toujours meilleures. La meilleure séparation jamais obtenue entre les deux étoiles d'un système binaire est d'environ deux millisecondes d'angle. Ce record est détenu par l'équipe de Christopher Koresko sur l'étoile TZ du Triangle, à l'aide de l'interféromètre prototype du Mont Palomar (PTI). Aujourd'hui, l'interférométrie optique est si précise que, souvent, ce ne sont plus les données interférométriques, mais les données spectroscopiques qui limitent notre connaissance des masses stellaires.

L'étude de la surface des étoiles

La mesure du diamètre d'une étoile est certes difficile, mais l'étude de sa surface l'est bien plus encore. La résolution, mais aussi la sensibilité doivent être excellentes, car les variations de la surface d'une étoile se traduisent par de faibles variations d'intensité.



Les «assombrissements centre-bord» en sont un exemple : parfois, le bord d'un disque stellaire, ce que les astronomes nomment le limbe, n'est pas aussi brillant que le centre. La lumière qui parvient du centre d'une étoile a traversé toute la profondeur de l'atmosphère, là où le gaz est particulièrement chaud et brillant. Au contraire, celle qui provient du limbe a traversé une couche de gaz plus froide et moins lumineuse. Les astronomes ont observé un assombrissement centre-bord sur le Soleil, et le phénomène existe sans doute sur toutes les étoiles, où il doit être plus ou moins important en fonction de leur spectre d'émission. Grâce à l'interférométrie optique, ils distinguent un disque uniforme d'un disque qui présente un assombrissement centre-bord. Grâce à l'étude de ce phénomène d'assombrissement, les astronomes testent leurs modèles d'atmosphère stellaire.

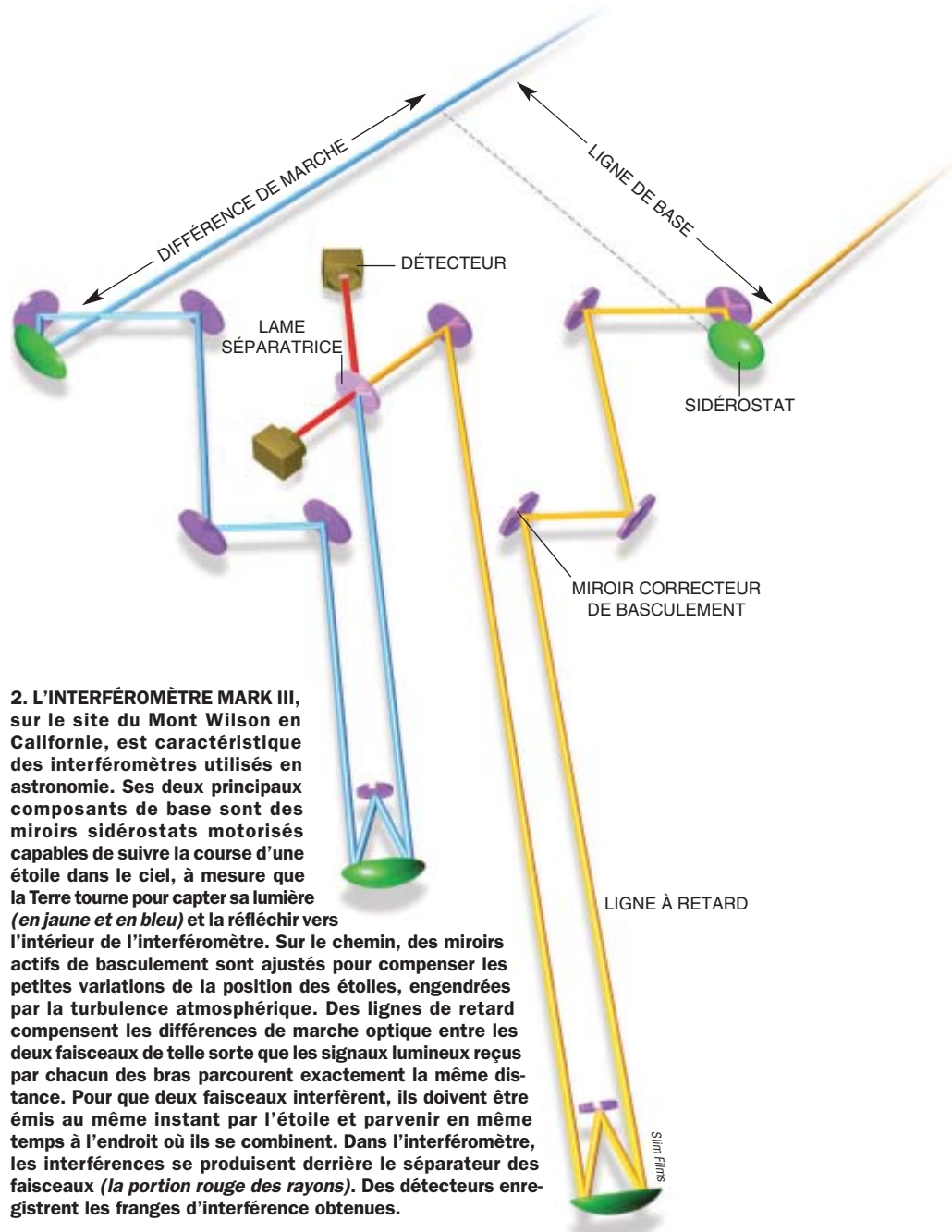
surface de Bételgeuse, et distinguer de nombreuses autres étoiles brillantes. En pratique, il n'en est rien à cause de la turbulence de l'atmosphère.

En fait, les astronomes sont dans la situation de quelqu'un qui tenterait de lire un message inscrit au fond d'une piscine. Quand la surface est parfaitement calme, on lit facilement le message. En revanche, quand le vent ride la surface, on ne peut déchiffrer les ondes lumineuses distordues qui parviennent du fond.

Dans l'espace, au-dessus de l'atmosphère, les ondes lumineuses issues des étoiles se propagent en ligne droite. Les fronts d'onde, c'est-à-dire les surfaces pour lesquelles l'onde a parcouru une distance identique depuis la source, sont perpendiculaires à la direction de propagation. Le défilement de l'onde équivaut à celui d'une liasse de feuilles de papier immaculées. Malheureusement, ces pages, où sont inscrits des fragments de l'histoire de l'Univers, sont froissées dès qu'elles pénètrent dans l'atmosphère. Les turbulences de l'atmosphère déforment les ondes à la façon d'une feuille de papier chiffonnée que l'on aurait tenté de défroisser avec la paume de la main.

Une fois que l'onde a traversé l'atmosphère, tout se passe comme si celle-ci était constituée d'un ensemble de facettes planes inclinées dans diverses directions. Dans le domaine des longueurs d'onde visibles, ces surfaces ont une taille comprise entre 5 et 20 centimètres suivant le temps et le vent, de sorte qu'un télescope de 10 mètres en reçoit quelques milliers. Les sections qui ont la même inclinaison se combinent en une même tache de l'étoile observée, nommée tavelure. Le résultat est une image mouchetée, dont les taches – les tavelures – bougent en permanence en fonction des modifications incessantes de l'atmosphère. Quand le temps de pose est supérieur à une fraction de seconde, l'image d'une étoile devient floue. L'effet de la turbulence est si important, que même dans des conditions atmosphériques très calmes, l'image que livre un télescope de 10 mètres est presque aussi floue que celle d'un télescope de 15 centimètres.

Les astronomes s'affranchissent de la turbulence atmosphérique grâce à la «*interférométrie des tavelures*» ; cette technique consiste à réduire les temps de pose à moins d'un centième de seconde, de façon à figer les tave-



2. L'INTERFÉROMÈTRE MARK III, sur le site du Mont Wilson en Californie, est caractéristique des interféromètres utilisés en astronomie. Ses deux principaux composants de base sont des miroirs sidérostats motorisés capables de suivre la course d'une étoile dans le ciel, à mesure que la Terre tourne pour capter sa lumière (en jaune et en bleu) et la réfléchir vers l'intérieur de l'interféromètre. Sur le chemin, des miroirs actifs de basculement sont ajustés pour compenser les petites variations de la position des étoiles, engendrées par la turbulence atmosphérique. Des lignes de retard compensent les différences de marche optique entre les deux faisceaux de telle sorte que les signaux lumineux reçus par chacun des bras parcourent exactement la même distance. Pour que deux faisceaux interfèrent, ils doivent être émis au même instant par l'étoile et parvenir en même temps à l'endroit où ils se combinent. Dans l'interféromètre, les interférences se produisent derrière le séparateur des faisceaux (la portion rouge des rayons). Des détecteurs enregistrent les franges d'interférence obtenues.

lures. Les astronomes ont ainsi réussi à mesurer des orbites d'étoiles binaires. Toutefois, l'obtention de bonnes images reste en pratique d'une grande difficulté.

Une autre technique, l'optique adaptative, nécessite des capteurs qui mesurent les distorsions de l'onde incidente et les transmettent à un ordinateur. Ce dernier calcule les distorsions qui compensent au mieux celles de l'onde, puis transmet les ordres nécessaires au miroir déformable. Le miroir déformable est réajusté environ toutes les millisecondes. Ce procédé est très performant, car il crée des images nettes dont la résolution est proche de la limite théorique fixée par l'ouverture du télescope.

Toutefois, ces performances sont insuffisantes pour que l'on mesure la

taille d'une étoile à partir de son image prise au télescope. Même si l'on parvenait à compenser parfaitement l'effet de la turbulence atmosphérique, un télescope de 10 mètres de diamètre ne distinguerait que quelques dizaines d'étoiles, celles dont le diamètre est de l'ordre de quelques centièmes de secondes d'angle. Pour évaluer le diamètre des seules étoiles visibles à l'œil nu (les plus proches ou les plus grosses), nous devrions construire un télescope dont le miroir aurait un diamètre de 500 mètres. Un tel miroir géant, construit avec une précision d'une fraction de micromètre, porté par une structure qui ne déformerait pas le miroir et qui orienterait le télescope vers l'étoile étudiée, n'est envisageable ni sur le plan technique ni sur le plan financier !

Par chance, grâce à l'interférométrie, la construction d'un miroir de 500 mètres de diamètre n'est pas indispensable : on place deux télescopes beaucoup plus petits à 500 mètres de distance, puis on combine leurs signaux lumineux en un point central, après avoir corrigé les effets de la turbulence atmosphérique.

Le principe de l'interférométrie optique

L'interférométrie optique est apparue en trois étapes : jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les astronomes ne savaient utiliser que des télescopes classiques ; puis ils apprirent à créer des interférences à partir des faisceaux recueillis par ces instruments ; finalement, ils tirèrent de cette technique le principe de l'interférométrie moderne. Comparons les instruments associés à chacune de ces étapes, afin de comprendre comment fonctionne un interféromètre : le premier est tout simple-

ment le télescope classique, avec son unique miroir primaire ; le second est le même télescope, mais son miroir primaire est entièrement masqué, à l'exception de deux petits segments ; le troisième instrument est un interféromètre, c'est-à-dire un ensemble de deux petits télescopes et d'un système optique conçu pour acheminer les faisceaux collectés vers un capteur. Chacun de ces instruments reçoit de la lumière et la transmet à son détecteur d'une façon différente. Ainsi, dans le premier instrument, le télescope classique, le miroir primaire fait converger vers le foyer des ondes ayant parcouru la même distance depuis qu'elle ont quitté l'étoile observée. Le deuxième télescope, partiellement masqué, fonctionne de la même façon, mais seuls les deux segments découverts recueillent de la lumière et la renvoient vers le foyer. Chacun de ces télescopes produit une image sur un détecteur placé au foyer. Celle du télescope partiellement masqué est de qualité infé-

rieure dans la mesure où seuls des fragments du miroir primaire sont utilisés.

L'interféromètre fonctionne un peu sur le principe du télescope partiellement masqué, dans la mesure où deux petits miroirs réfléchissent la lumière. Toutefois, ce troisième instrument se distingue par plusieurs aspects. Les deux miroirs primaires d'un interféromètre ne sont pas solidaires, c'est-à-dire qu'ils ne font pas partie d'une même structure rigide orientée vers l'étoile. Dans l'interféromètre, une telle autonomie est possible, parce que les miroirs collectent les rayons lumineux émis par l'étoile, mais n'assurent pas la recombinaison des faisceaux recueillis.

La deuxième différence tient à la façon dont un interféromètre combine de façon synchrone les deux faisceaux qu'il reçoit. En général, les deux miroirs primaires ne sont pas rigoureusement à la même distance de l'étoile, de sorte que le front d'onde atteint le miroir le plus proche avant l'autre. C'est pour-

Histoire de l'interférométrie

1868 : Le physicien français Armand Hippolyte Louis Fizeau a une idée : masquer l'ouverture d'un télescope pour faire de l'interférométrie. Il propose de mesurer la taille des étoiles en plaçant un masque percé de deux trous sur un télescope, et d'observer les interférences qui en résultent.

1876 : Édouard Stephan applique la technique de Fizeau sur le télescope de 80 centimètres de Marseille, mais les deux trous du masque ne sont séparés que de 65 centimètres, ce qui est insuffisant pour mesurer le diamètre des étoiles. Stephan observe en fait deux images de grande taille et qui se recouvrent partiellement. Des franges d'interférences strient la zone de recouvrement. Stephan met au point une méthode pour mesurer la taille d'une étoile : il fait varier la distance qui sépare les deux trous jusqu'à ce que les franges d'interférences disparaissent. La taille de l'étoile se déduit de l'intervalle ainsi couvert. Plus les trous doivent être écartés, plus l'étoile est petite. Toutefois, les performances du dispositif de Stephan sont limitées par la taille du miroir qu'il utilise. Il en conclut que toutes les étoiles qu'il observe sont plus petites que seize centièmes de seconde d'angle.

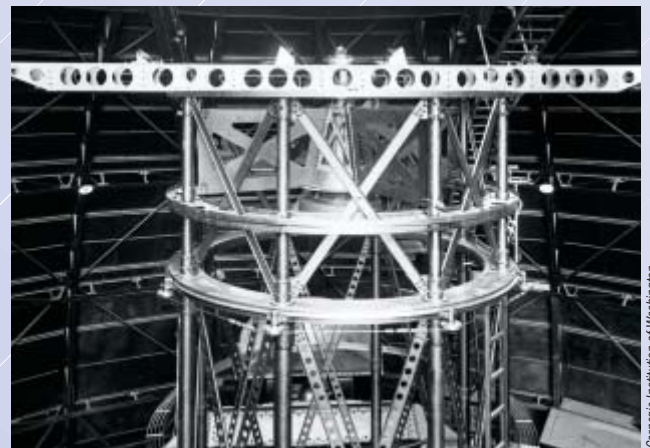
1891 : Apparemment sans avoir eu vent des travaux de Fizeau et de Stéphane, Albert Michelson applique la même technique à l'observation des satellites de Jupiter. Il parvient à mesurer leur diamètre, notablement supérieur à celui d'une étoile, puisqu'il est compris entre une et deux secondes d'angle.

1920 : Pour mesurer le diamètre des étoiles, Michelson place au sommet du télescope Hooker de 2,50 mètres du Mont Wilson, en Californie, une poutre d'acier de six mètres supportant un miroir à chaque extrémité. Au cours des années 1930, son collègue Francis Pease tente de construire un interféromètre dont les miroirs sont séparés de 15 mètres. Toutefois, il échoue, sans doute parce que la structure qui supportait ses miroirs n'était pas assez rigide.

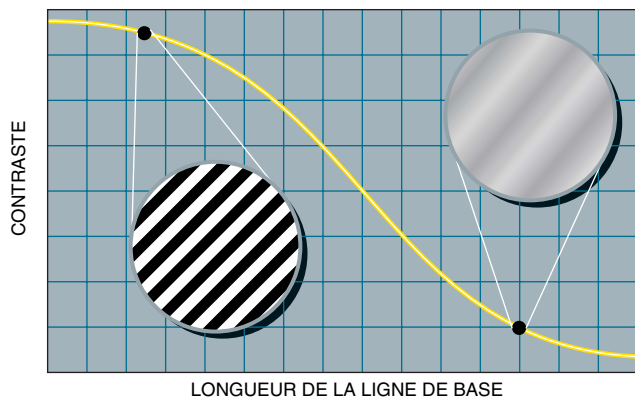
Années 1950 et 1960 : Les observations astronomiques progressent notablement grâce à l'interférométrie dans le domaine des

ondes radio. L'interférométrie radio est plus simple que l'interférométrie optique, car les longueurs d'onde des ondes radio sont des milliers de fois plus grandes que celles des ondes visibles, de sorte qu'elles sont moins sensibles à la turbulence atmosphérique, et que la précision nécessaire pour l'obtention d'interférences est inférieure. Les ondes radio ont aussi l'avantage de pouvoir être électroniquement amplifiées ou enregistrées avant d'être combinées.

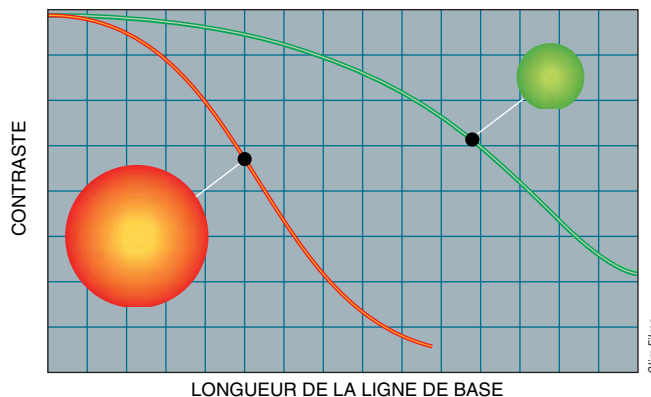
1958-1976 : La construction de l'Interféromètre implanté à Narrabri, en Australie, par Robert Brown, Richard Twiss et leurs collègues fait progresser la technique. D'abord, ils utilisent, pour la première fois, deux télescopes séparés au lieu de deux miroirs installés sur une même grande structure. Les deux télescopes de 6,50 mètres d'ouverture qu'ils utilisent peuvent être séparés d'une distance qui varie entre 10 et 188 mètres, un record qui reste encore à battre aujourd'hui ! Ensuite, ils sont les premiers à utiliser des dispositifs électroniques de détection et d'enregistrement des données, tandis que les astronomes, avant eux, avaient toujours utilisé leurs propres yeux.



Carnegie Institution of Washington



3. LES FRANGES D'INTERFÉRENCE formées par une étoile isolée (à gauche) sont plus contrastées quand les deux télescopes utilisés sont peu éloignés. Le diamètre apparent de l'étoile, c'est-à-dire l'angle sous lequel on l'observe, se déduit du contraste des franges (à droite).



Quand l'éloignement entre les télescopes augmente, le contraste des franges d'interférence des étoiles de grande taille (en rouge) diminue plus vite que celui des étoiles de petites tailles (en vert). L'étude des petites étoiles nécessite des télescopes très éloignés.

quoi les interféromètres sont équipés de «lignes de retard», c'est-à-dire de miroirs intermédiaires montés sur des chariots mobiles ; leur rôle est de compenser les différences de chemin optique entre les deux «bras» de l'interféromètre (les parcours des deux faisceaux recueillis).

Un interféromètre se différencie aussi en ceci qu'il forme non pas une image de l'étoile étudiée, mais l'interférence de deux faisceaux. Lorsque les sommets des ondes qui proviennent du premier miroir coïncident avec ceux des ondes qui proviennent du second miroir, les ondes sont en phase, et les

interférences sont constructives : l'intensité est maximale. Au contraire, dans le cas d'interférences destructives, les ondes, en opposition de phase et les sommets des ondes du premier miroir coïncident avec les creux des ondes issues du second miroir, et l'intensité est minimale. Cette alternance de zones

Brown et Twiss innoveront aussi en détectant individuellement les photons sur chaque télescope et en corrélant leur instant d'arrivée (les photons suffisamment proches contribuent à la même image). La méthode est d'une grande simplicité, puisque les faisceaux lumineux n'ont pas à être combinés, mais la sensibilité est médiocre. Même au bout de 100 heures d'observation, les astronomes ne peuvent étudier que des étoiles assez brillantes (celles dont la magnitude est inférieure à 2,5, ce qui correspond à la luminosité des étoiles de la ceinture d'Orion).

1974 : Deux équipes utilisent des télescopes séparés et des techniques de détection plus sensibles. Antoine Labeyrie et ses collègues de l'Observatoire de la Côte d'Azur sont les premiers à appliquer la technique de Michelson dans le domaine visible. Ils créent des interférences avec deux faisceaux distants de 12 mètres et observent l'étoile Véga. À Kitt Peak, dans l'Arizona, l'équipe de Charles Townes applique une technique de radioastronomie pour observer Mercure dans l'infrarouge moyen avec un interféromètre de 5,5 mètres de ligne de base. La méthode consiste à convertir un signal à hautes fréquences en un signal à fréquences inférieures, comme un poste de radio convertit les signaux des ondes à modulation de fréquences qu'il reçoit à 100 mégahertz en ondes sonores adaptées au domaine perçu par l'oreille humaine.

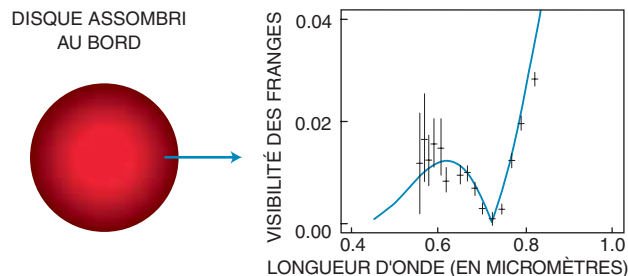
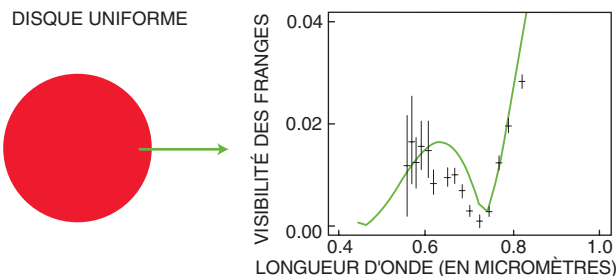
1980 : Un interféromètre radio de grandes dimensions, le VLA (Very Large Array), entre en service à Socorro, au Nouveau-Mexique. Il fournit des milliers de résultats importants.

Années 1980 et 1990 : Après les progrès réalisés par A. Labeyrie et Ch. Townes, les recherches sur l'interférométrie optique se sont intensifiées. Ch. Townes a poursuivi les travaux entrepris au début des années 1970 dans le domaine de l'infrarouge moyen. Son équipe utilise aujourd'hui un interféromètre constitué de deux télescopes de 1,60 mètre qui peuvent être séparés de 32 mètres au maximum. Ces astronomes étudient les poussières qui entourent les étoiles à la fin de leur vie. Un troisième télescope sera



bientôt disponible, qui fournira une ligne de base supplémentaire de 75 mètres.

Depuis 1974, les astronomes ont construit une dizaine d'interféromètres opérant dans le visible et dans le proche infrarouge : huit sont en service, et cinq en construction. Tous reprennent l'architecture utilisée par A. Labeyrie, à quelques différences près : la ligne de base est supérieure et peut atteindre 80 mètres, comme c'est le cas, par exemple, à l'interféromètre stellaire SUSI de l'Université de Sydney, en Australie ; l'ouverture maximale a augmenté et atteint 1,5 mètre dans le télescope GI2T de l'observatoire de la Côte d'Azur, à Nice ; plusieurs télescopes sont utilisés simultanément (quatre dans l'interféromètre *Optical Aperture Synthesis Array* de Cambridge, ce qui est un record) ; la gamme des longueurs d'onde s'est élargie. Ainsi, celle du prototype américain *Navy Prototype Optical Interferometer*, situé à Anderson Mesa, aux États-Unis, s'étend de 450 à 850 nanomètres.



Johnny Johnson : source NPOI

4. L'ASSOMBRISSEMENT du bord d'une étoile peut être évalué à l'aide d'un interféromètre. Les données obtenues pour Alpha de Cassiopée (les croix) ne s'accordent pas bien avec celles que prévoit la théorie quand on considère cette étoile comme un disque d'intensité uniforme (en haut). En revanche, les données théoriques et expé-

mentales coïncident mieux quand on postule que le limbe d'Alpha de Cassiopée est assombri. De tels résultats fournissent des informations précieuses sur l'atmosphère des étoiles, mais nécessitent de grandes lignes de base pour atteindre une résolution angulaire plus fine que le diamètre apparent de l'étoile.

brillantes et de zones sombres constitue les franges d'interférence.

Les astronomes mesurent le contraste entre les franges, qu'ils nomment la «visibilité des franges». La visibilité varie en fonction des caractéristiques de la source lumineuse, la taille d'une étoile, par exemple, ou encore la distance entre les deux compagnons d'un système binaire ; le contraste varie aussi pour un objet donné en fonction de la longueur et de l'orientation de la ligne qui relie les deux miroirs primaires, nommée

ligne de base. Une façon simple de faire varier la longueur et l'orientation de cette ligne est de se servir de la rotation de la Terre. Les astronomes attendent que celle-ci introduise un retard, puis ils le compensent à l'aide d'une ligne de retard. Par ailleurs, la plupart des interféromètres de nouvelle génération utilisent plus de deux télescopes, dont certains peuvent être déplacés sur des rails.

Quel que soit le type d'interféromètre employé, il faut traiter les

signaux recueillis. À l'aide d'algorithmes fondés sur la transformée de Fourier, les astronomes convertissent les franges mesurées en une image de l'astre étudié. Le résultat est identique à l'image imparfaite que l'on obtiendrait avec un télescope partiellement masqué dont le diamètre serait égal à la ligne de base de l'interféromètre. La résolution de cette image est très bonne, mais l'image est incomplète, car elle ne contient qu'une partie des informations

L'interférométrie, une technique européenne

J'aime être aux commandes d'un interféromètre pointé vers l'un de mes astres préférés. Pendant que j'attends qu'un signal sonore m'indique que les franges sont là, j'imagine que deux des photons qui les forment ont quitté en même temps l'étoile que j'étudie. Ils ont traversé l'espace immense pendant 500 ans, avant d'être capturés par mes deux énormes télescopes. Après une course dans un dédale de miroirs, ils ont fini par atteindre au même moment le lieu de leur rendez-vous : celui des interférences. Et si des franges sont là, cela signifie qu'à un millièmètre près ils ont parcouru exactement la même distance !

Ce plaisir de l'interférométrie, les astronomes européens ont été les premiers à le découvrir. Non sans difficultés, tant la technique est complexe, ardue, voire ingrate. Tout récemment, de premières franges ont été obtenues au VLTI, à l'Observatoire européen installé sur le mont Paranal, au Chili. Ce premier test passé avec succès démontre la maturité technique atteinte par l'interférométrie européenne, car le VLTI est le premier et le seul grand interféromètre conçu pour que tous les astronomes puissent l'utiliser. L'interférométrie optique cesse enfin d'être affaire de spécialistes !

Avant d'en arriver là, les astronomes européens ont accumulé des dizaines d'années d'expérience et multiplié les «premières» dans tous les domaines de longueur d'onde. Ainsi, en 1974, le Français Antoine Labeyrie est le premier à obtenir des franges dans le domaine des longueurs d'onde visibles à partir de télescopes séparés. En 1973, Jean Gay observe des franges par détection hétérodyne, une technique qui consiste à mélanger au signal à haute fréquence de l'astre observé le signal issu d'un laser afin d'obtenir un signal de fréquence moyenne beaucoup plus facile à traiter. Jean Gay a appliqué cette technique au Soleil dans la gamme de longueur d'onde des dix micromètres (infrarouge). L'Italien Paolo Di Benedetto est le premier à utiliser un

détecteur pour mesurer directement des franges formées dans le domaine de l'infrarouge proche. Quatre ans plus tard, l'équipe d'Antoine Labeyrie mène les premières observations dans le domaine visible à partir des deux grands télescopes de 1,50 mètres du GI2T de l'Observatoire de la Côte d'Azur. John Baldwin de l'Université de Cambridge est le premier à reconstruire une image à partir de mesures interférométriques en 1996.

Outre ces percées, les astronomes européens sont à la source de nombreuses innovations techniques. Ainsi, l'interféromètre GI2T de l'Observatoire de la Côte d'Azur est le seul au monde à intégrer un spectrographe à haute résolution en son foyer. Cet instrument analyse le spectre de la lumière qui provient des étoiles, ce qui permet de distinguer où se trouvent les différents composants chimiques de l'atmosphère de l'étoile.

C'est aussi en Europe qu'est née l'idée de construire un interféromètre avec des fibres optiques, astuce qui rend envisageable les très grandes lignes de base. Lancée par Claude Froehly de Limoges en 1981, cette solution fut ensuite appliquée avec succès par le groupe de Jean-Marie Mariotti, de l'Observatoire de Paris, en 1991. Comme l'utilisation de fibres facilite le suivi des fluctuations de l'atmosphère, cette méthode a conduit aux résultats les plus précis dont disposent les astronomes aujourd'hui. C'est pourquoi, en 1996, des astronomes de l'Observatoire de Grenoble ont proposé d'augmenter encore sa puissance en remplaçant les optiques qui composent l'instrument par un seul composant d'optique intégrée issue des techniques mises au point pour Internet.

Le VLTI qui vient de rentrer en fonctionnement concentre tout le savoir-faire accumulé en Europe en trente ans. La possibilité de transformer l'installation en interféromètre avait été prévue dès l'origine, en 1976. Le projet poursuivi à l'époque était celui d'un gigantesque télescope dont le miroir monolithique aurait mesuré 16 mètres.

émises par la source. L'astronome regarde à travers un interféromètre comme quelqu'un qui observerait une maison dissimulée derrière une palissade ajourée. Il verrait une image partielle de la maison, mais, en se déplaçant à bicyclette devant la palissade, la maison défilerait entre les planches de la clôture. De même, les astronomes combinent plusieurs lignes de base, de sorte que les images sont plus précises.

Difficultés de mise en œuvre

Un interféromètre optique évite les difficultés de construction et les coûts exorbitants des télescopes géants, mais pose des difficultés spécifiques. Ainsi, les faisceaux lumineux de chaque télescope sont convoyés sur des dizaines, voire sur des centaines de mètres jusqu'au laboratoire où ils interfèrent. Or, des ondes lumineuses de différentes longueurs d'onde ne se propagent pas à la même vitesse dans l'air. Pour préserver les

interférences, les faisceaux sont donc convoyés dans le vide. Ces difficultés impliquent que le coût de l'infrastructure d'un interféromètre augmente rapidement avec la longueur de sa ligne de base et le nombre de ses composants.

Un interféromètre de plus de deux télescopes engendre des images plus précises de l'objet étudié, car il produit des franges pour plusieurs lignes de base simultanément. Toutefois, la multiplication des télescopes a aussi sa limite. Ainsi, dans un interféromètre à dix télescopes, chaque faisceau devrait être séparé en neuf sous-faisceaux que l'on combinerait avec les sous-faisceaux des autres télescopes. Ces séparations successives diminuent la sensibilité de l'interféromètre, car chaque groupe de franges est produit avec un nombre réduit de photons. Pour cette raison, le nombre maximum de télescopes utilisables est compris entre 5 et 20. Par ailleurs, la complexité du système optique nécessaire pour combiner tous ces faisceaux croît rapidement,

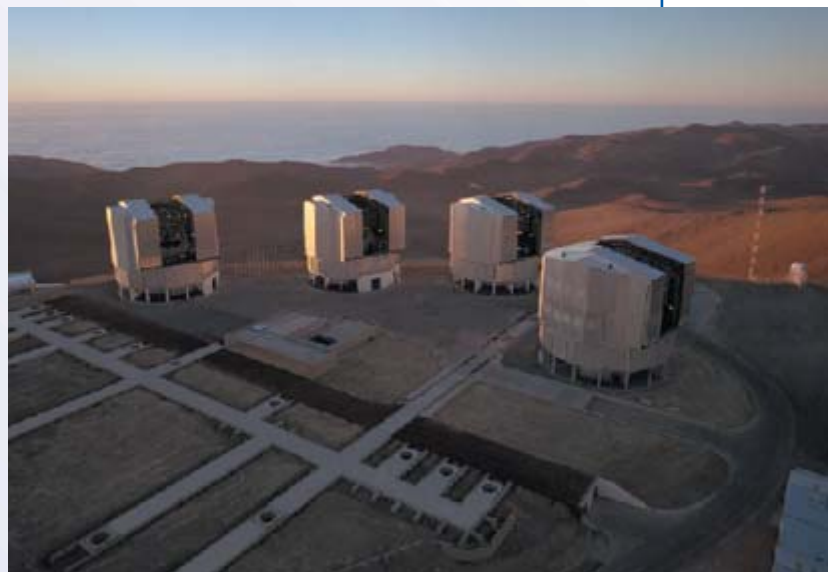
car le nombre de lignes de base disponibles augmente très vite avec le nombre de télescopes. Ainsi, deux télescopes ont une seule ligne de base, mais 10 en ont 45 possibles. Notons en outre que, sur chaque trajet lumineux, chacun des nombreux miroirs absorbe environ un pour cent des photons qu'il reçoit...

Si la turbulence atmosphérique est la plaie des grands télescopes, elle est aussi celle des interféromètres. Son effet est de faire trembloter les étoiles dans le ciel, introduisant ainsi une fluctuation constante des positions stellaires. Le recouvrement des paires de faisceaux est alors imparfait, voire insuffisant. Pour cette raison, les astronomes placent sur le chemin de chaque faisceau des miroirs qui corrigent l'orientation en fonction de la mesure que des capteurs font de la turbulence. Ces corrections ressemblent à celles qu'utilise l'optique adaptative, mais sont loin de résoudre tous les problèmes. La turbulence atmosphérique crée un autre obstacle : elle retarde chaque faisceau d'une façon

Comme la réalisation d'un tel instrument s'est heurtée à des obstacles quasi insurmontables, les astronomes ont opté à partir de 1987 pour un ensemble de quatre télescopes de 8 mètres de diamètre : le VLT. Un tel dispositif est tout aussi sensible qu'un télescope de 16 mètres de diamètre, puisque sa surface collectrice est la même. En outre, sa conception marie l'exploitation conventionnelle des télescopes avec une utilisation sur le mode interférométrique. Quand il est utilisé ainsi, le VLT devient le VLTI et constitue l'interféromètre optique le plus sensible du monde. Sa résolution équivaut à celle d'un télescope géant de 130 mètres de diamètre !

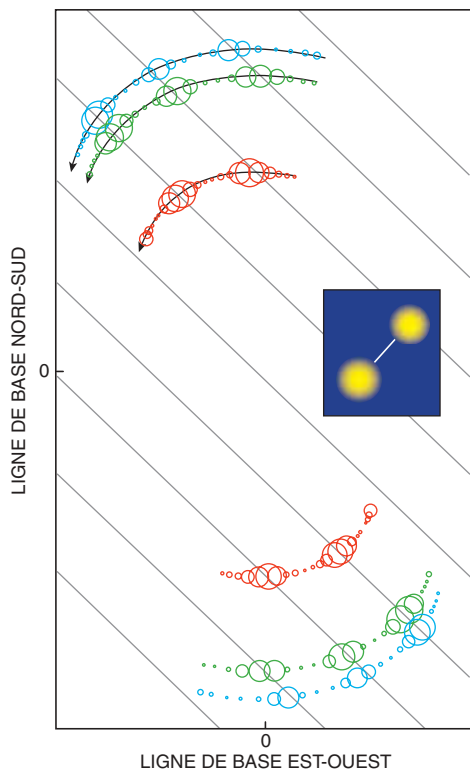
Les astronomes européens ont décidé de rendre le VLTI encore plus performant en lui adjoignant trois télescopes de 1,80 mètre mobiles sur une base de 200 mètres de long. Ainsi, le VLTI exploitera sept télescopes, dont quatre géants. Toute l'installation sera automatique, et il suffira aux astronomes de programmer leurs séquences de mesure pour l'exploiter. Le VLT vient de subir un premier test de fonctionnement à partir de deux sidérostats. Les astronomes ont mesuré le diamètre apparent de l'étoile de Sirius et trouvé $0,00929 \pm 0,00017$ seconde d'angle, un résultat en parfait accord avec la valeur du diamètre de l'étoile géante.

Aujourd'hui, les astronomes s'intéressent à l'interférométrie de très près, car c'est la seule méthode disponible pour rechercher et étudier les planètes extra-solaires de type terrestre. La NASA en a fait la pierre angulaire de son programme *Origins*, consacré à la recherche de la vie en dehors du Système solaire. Dans ce cadre, ses efforts en interférométrie au sol portent principalement sur l'interféromètre *Keck*. L'Agence spatiale prépare aussi pour la fin de la décennie le satellite *Space Interferometry Mission*. Il tentera de détecter de façon indirecte des planètes de type terrestre depuis l'espace, grâce à son interféromètre embarqué. Pour sa part, l'Agence spatiale européenne prépare la mission *DARWIN* de recherche de vie extrasolaire pour 2020. L'idée est de créer simultanément des interférences à partir de la lumière des astres lumineux du voisi-



nage solaire et à partir d'un autre signal beaucoup plus faible. Normalement indécélables dans le bruit de fond, les franges d'un objet peu lumineux deviendront visibles si elles sont placées à l'intérieur des franges sombres d'un astre lumineux, qui normalement nous aveugle. Grâce à cette astuce, les astronomes espèrent percevoir des signaux environ un million de fois plus faibles que les signaux stellaires habituels, ce qui devrait rendre les exoplanètes directement observables. Si une éventuelle exo-Terre était observée ainsi, son spectre serait analysé dans l'espoir d'y détecter la raie de l'ozone, la signature de la présence d'une forme de vie utilisant le carbone et l'oxygène.

Fabien MALBET, CNRS, Observatoire de Grenoble est responsable scientifique du projet AMBER.



Johnny Johnson : source Mark III Interferometer

5. L'ÉTOILE BINAIRE CAPELLA de la constellation du Cocher produit ce type de franges obtenues par l'Interféromètre Mark III. À mesure que la Terre tourne, la ligne de base de l'interféromètre décrit un arc d'ellipse. La taille des cercles indique l'intensité des franges d'interférence observées pour trois longueurs d'onde (les trois couleurs). Les positions où la visibilité est maximale sont situées sur des lignes régulièrement espacées. Les deux étoiles de Capella sont orientées perpendiculairement à ces lignes et sont séparées d'une distance qui varie en sens inverse de la distance entre les lignes.

non seulement aléatoire, mais très variable, car les télescopes reçoivent des ondes qui ont traversé des zones de turbulence différentes. La qualité des interférences et des franges est dégradée. Cet effet doit être éliminé aussi bien que possible, tout particulièrement lorsqu'on scrute des étoiles peu brillantes ou si l'on veut améliorer la précision.

Toutes ces indispensables corrections limitent la sensibilité des interféromètres, et l'augmentation de la taille des télescopes ou des temps de pose n'y fait rien. L'information nécessaire aux corrections est mesurée sur le signal émis par l'objet étudié ou par un de ses tout proches voisins. Les ouvertures des télescopes utilisés pour cette mesure doivent ne pas excéder 20 centimètres, ce qui permet de suivre une seule tavelure à la fois ; de plus, l'information doit être obtenue en moins de 10 millisecondes, de

sorte que la turbulence atmosphérique n'ait pas le temps de faire bouger notablement les franges ni les tavelures. L'image des franges doit être enregistrée en quelques millisecondes, là encore pour éviter que la turbulence atmosphérique ne brouille les franges.

Au final, l'interférométrie optique nécessite la maîtrise de techniques complexes et nombreuses. Elles vont de l'emploi de photo-détecteurs ultrarapides à celui d'ordinateurs capables d'enregistrer plusieurs gigaoctets par nuit, en passant par l'utilisation de lasers à fréquences stabilisées pour le contrôle des lignes de retard une fois par milliseconde. Ces diverses techniques sont progressivement devenues disponibles au cours des vingt dernières années, mais les astronomes ne savent les utiliser de façon optimale que depuis peu.

Quelles perspectives pour l'interférométrie optique ?

Cette complexité technique confère aux interféromètres optiques actuels une limite incontournable : ils sont peu sensibles. En fait, ils le sont à peine plus que l'œil nu, malgré leur excellente résolution angulaire ! Même si cet état de fait limite les observations à quelques milliers d'étoiles parmi les plus brillantes, les interféromètres procurent aux astronomes des données si intéressantes qu'elles justifient à elles seules les efforts déployés. Heureusement, ces limites seront dépassées dès que des dispositifs d'optique adaptative plus performants seront disponibles sur les groupes de télescopes géants.

Les interféromètres optiques et infrarouges que les astronomes sont en train de construire sont déjà plus perfectionnés. Ainsi, des interféromètres à plusieurs télescopes devraient bientôt fonctionner. C'est le cas, par exemple, du NPOI (*Navy Pro-*

TOTYPE Optical Interferometer) construit en Arizona, avec six télescopes et 15 lignes de base disponibles. S'ils disposent de suffisamment de données, les astronomes pourraient, en principe, dès aujourd'hui cartographier la surface d'une étoile, s'ils employaient des méthodes inspirées de celles de l'interférométrie radio. Dans la pratique, l'interférométrie optique ne s'applique pour le moment qu'aux objets qui ont la structure la plus simple : les étoiles binaires. Cependant, les astrophysiciens mettent déjà au point les algorithmes nécessaires à la cartographie d'étoiles elliptiques, d'étoiles tachées, d'étoiles qui éjectent de la matière, etc. Un long chemin doit néanmoins être encore parcouru avant que les interféromètres optiques n'atteignent l'efficacité de leurs cousins opérant aux grandes longueurs d'onde du domaine radio.

Deux interféromètres équipés d'optiques adaptatives de pointe rendront possible d'ici peu l'observation d'objets de faible luminosité avec une résolution angulaire exceptionnelle. Il s'agit du VLT (le *Very Large Telescope* de l'Observatoire européen austral, au Chili) qui exploite un réseau de quatre télescopes de huit mètres, et de l'Interféromètre *Keck* composé de deux télescopes de dix mètres espacés de 85 mètres. Ces installations seront bientôt complétées à l'aide de petits télescopes plus espacés. On pense aussi utiliser des interféromètres satellisés, ce qui éviterait les difficultés liées à la turbulence atmosphérique. Trois projets sont en cours : *Space Interferometer Mission*, *Terrestrial Planet Finder* et *MicroArcsecond X-ray Imaging Mission*, qui visent à doter l'astrométrie, c'est-à-dire la branche de l'astronomie qui mesure les positions des étoiles, d'une précision de l'ordre du millionième de seconde d'angle, laquelle est nécessaire à la détection des exoplanètes.

Arsen Hajian est astronome à l'Observatoire naval des États-Unis, et a rejoint le groupe du NPOI en 1995. Thomas Armstrong est astronome au Laboratoire de recherche navale de Washington. Il est l'un des concepteurs du NPOI. Pierre LÉNA, *Méthode de physique de l'Observation*, éditions du CNRS, 1996. John W. Hardy, L'optique adaptative, in *Pour la Science*, n° 202, août 1994.

M. SHAO et COLAVITA, *Long-Baseline Optical and Infrared Stellar Interferometry*, in *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 30, pp. 457-498, 1992.

Thomas ARMSTRONG, Donald HUTTER, Kenneth JOHNSTON et David MOZURKEWICH, *Stellar Optical Interferometry in the 1990s*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 5, pp. 42-49, mai 1995.

