

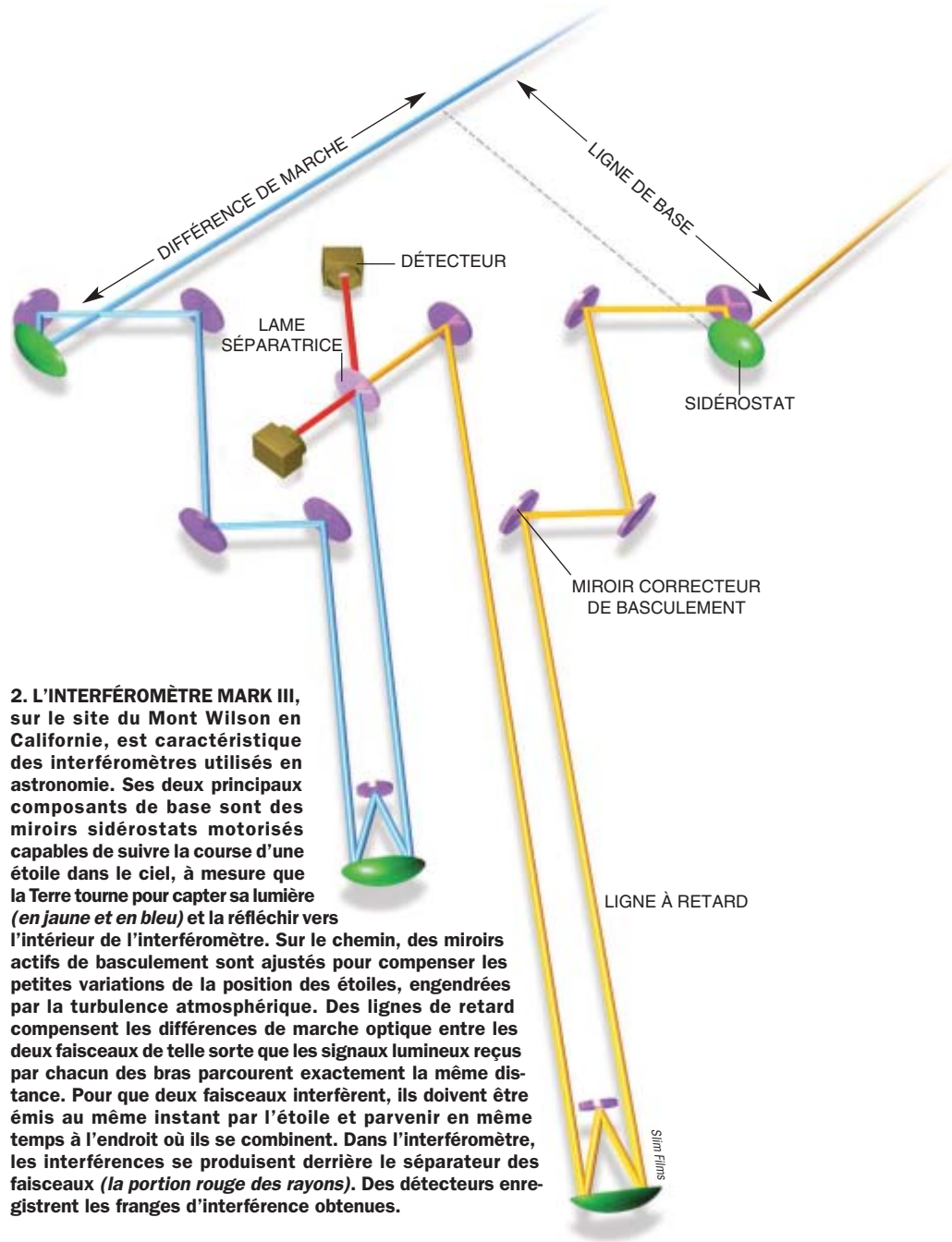
surface de Bételgeuse, et distinguer de nombreuses autres étoiles brillantes. En pratique, il n'en est rien à cause de la turbulence de l'atmosphère.

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 l'«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.

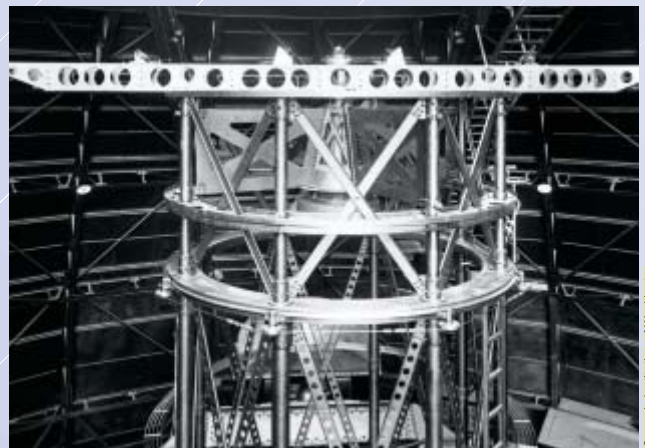
1891 : Apparemment sans avoir eu vent des travaux de Fizeau et de Stéphane, Albert Michelson applique la même technique à l'observation des satellites de Jupiter. Il parvient à mesurer leur diamètre, notablement supérieur à celui d'une étoile, puisqu'il est compris entre une et deux secondes d'angle.

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.

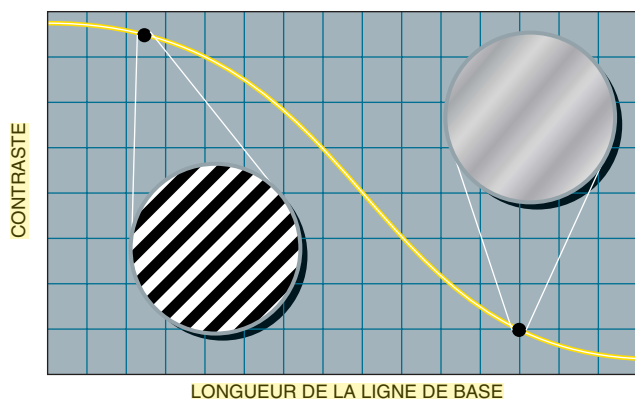
Années 1950 et 1960 : Les observations astronomiques progressent notablement grâce à l'interférométrie dans le domaine des

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.

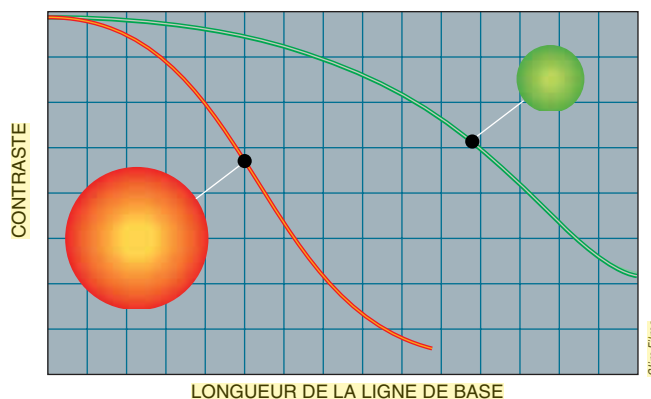
1958-1976 : La construction de l'Interféromètre implanté à Narrabri, en Australie, par Robert Brown, Richard Twiss et leurs collègues fait progresser la technique. D'abord, ils utilisent, pour la première fois, deux télescopes séparés au lieu de deux miroirs installés sur une même grande structure. Les 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.

quoï 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.

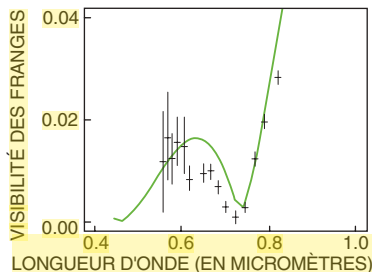
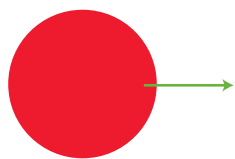
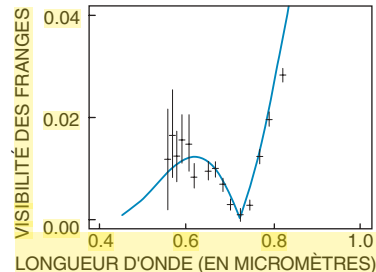
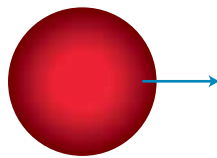
Années 1980 et 1990 : Après les progrès réalisés par A. Labeyrie et Ch. Townes, les recherches sur l'interférométrie optique se sont intensifiées. Ch. Townes a poursuivi les travaux entrepris au début des années 1970 dans le domaine de l'infrarouge moyen. Son équipe utilise aujourd'hui un interféromètre 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.

DISQUE UNIFORME

DISQUE ASSOMBRI
AU BORD

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 millième de millimètre 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 G12T 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 G12T 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.