

Johnny Johnson : source NPOI

4. L'ASSOMBRISEMENT 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 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.

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,

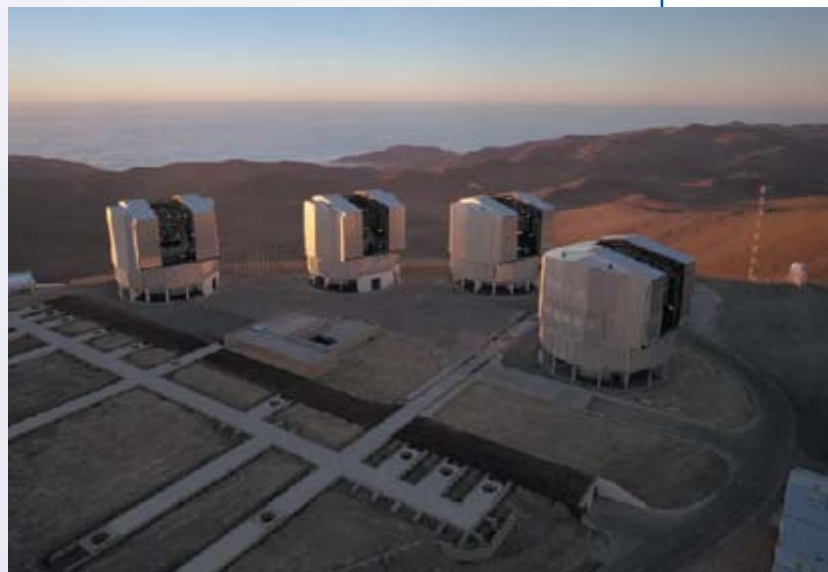
car le nombre de lignes de base disponibles augmente très vite avec le nombre de télescopes. Ainsi, deux télescopes ont une seule ligne de base, mais 10 en ont 45 possibles. Notons en outre que, sur chaque trajet lumineux, chacun des nombreux miroirs absorbe environ un pour cent des photons qu'il reçoit...

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.