

La percée attendue des télescopes géants interférométriques

Antoine LABEYRIE

Collège de France
et Observatoire de Haute Provence (CNRS)
04870 Saint Michel l'Observatoire, France
e.mail: labeyrie@obs-hp.fr

Résumé. Des progrès théoriques récents concernant l'analyse de la formation des images dans un interféromètre dilué à N ouvertures montrent que de tels instruments auront des performances plus élevées que prévu. Des progrès techniques en matière de miroirs actifs et de montures laissent espérer la construction de tels instruments sous la forme de réseaux de télescopes ayant des dimensions de l'ordre de 10 m, répartis sur une plate-forme de plusieurs kilomètres. De tels instruments peuvent en principe former des images résolues de planètes extra-solaires.

The expected breakthrough of giant interferometric telescopes

Abstract. *Recent theoretical advances in the analysis of image formation in diluted interferometric arrays of N apertures show that the observing performance can be higher than previously expected. Technical progress in the way of active mirrors and telescope mounts announce the construction of such instruments in the form of 10m telescopes, arrayed on a platform spanning several kilometers. Such instruments can in principle produce resolved images of extra-solar planets.*

Introduction

L'interférométrie a fait des miracles pour ceux qui observent l'univers aux longueurs d'ondes radio. Elle se prépare à en faire autant aux longueurs d'onde de l'optique, de l'ultraviolet à l'infrarouge. C'est pourtant en optique que tout commença, dès 1868, lorsque Hippolyte Fizeau suggéra de masquer l'ouverture d'un télescope avec un écran percé de deux ouvertures. Mais la maîtrise de grandes structures mécano-optiques, dont il faut asservir la géométrie avec une précision comparable à la longueur d'onde de la lumière, commence seulement à devenir possible. Au sol et dans l'espace, en ballon peut-être aussi, fleuriront des sortes de fleurs géantes, marguerites à nombreux pétales collectant la lumière d'une étoile lointaine pour la concentrer en leur coeur. 10 km au sol, 100 km dans l'espace, semblent des dimensions possibles. Avec quelques dizaines ou centaines d'ouvertures, formées de télescopes indépendants, de véritables images seront obtenues, et cela avec une résolution élevée, des milli- ou des micro-secondes d'arc.

1. Progrès récents concernant la théorie des interféromètres

Les instruments auxquels nous pensons ont des ouvertures très diluées, comme c'est le cas pour les antennes radio du VLBI (*Very Long Baseline Interferometer*), espacées de milliers de kilomètres. Quelques dizaines de télescopes, disposés sur un plateau de plusieurs kilomètres, fournissent des images que l'on superpose, après avoir soigneusement égalisé les longueurs des chemins optiques au dixième de micron près pour mettre les vibrations lumineuses en phase.

Comment extraire au mieux l'information portée par la lumière pour reconstruire une image à haute résolution ? L'image recombinaison de façon "naturelle", en configurant l'optique pour reproduire ce que donnerait un télescope géant portant un écran percé de petites ouvertures, n'est guère utilisable lorsque l'ouverture est très diluée. Elle comporte en effet un large halo de lumière diffractée autour de l'image centrale, laquelle ne contient qu'une faible partie de l'énergie, 10^{-3} par exemple s'il s'agit de 27 télescopes de 10 m disposés sur un cercle de 1 km. On peut modifier le recombineur selon le schéma utilisé par Michelson pour la poutre de 20 pieds qu'il installa en haut du télescope du mont Wilson. Cela revient à reconfigurer la pupille, à la densifier en augmentant dans la pupille de sortie la dimension relative des sous-ouvertures (*fig. 1*).

Alors que ce mode de fonctionnement semblait compromettre l'obtention d'images, Tallon & Tallon-Bosc (1992) ont démontré que leur reconstruction *a posteriori* reste possible. J'ai pu montrer récemment (Labeyrie, 1996) que ce principe est généralisable au cas de N ouvertures, et qu'une image à haute résolution concentrant la majeure partie de la lumière peut directement être obtenue au foyer recombinaison à condition que la densification respecte la disposition des centres des sous-ouvertures dans la pupille de sortie. La densification ainsi produite sur la pupille se traduit alors par un effet de fenêtre qui réduit le champ, et par un effet de blaze qui concentre l'énergie dans la partie utile de l'image.

La démonstration de ce résultat est donnée dans l'article précédemment cité, mais un raisonnement simple permet de le retrouver : on peut considérer la pupille d'un réseau de télescopes cophasés comme la convolution d'une sous-pupille, typiquement en forme de disque, avec un réseau de pics de Dirac. La fonction d'étalement dans le plan focal recombinaison est le produit des transformées de Fourier correspondantes, ou du carré de leur module si l'on considère les intensités. La première est une large tache d'Airy, que l'on peut appeler "enveloppe de diffraction", et la seconde une "fonction d'interférence" comportant, si la mise en phase satisfait la tolérance de Rayleigh, un pic central étroit qui est N fois plus intense que le niveau moyen des pics secondaires.

Densifier la pupille de sortie (*fig. 1*) a pour effet de rétrécir l'enveloppe de diffraction par rapport à la fonction d'interférence, ce qui concentre la lumière dans le pic central et augmente donc son intensité. On peut parler d'un effet de blaze, qui peut atteindre trois à cinq ordres de grandeur en pratique, car la situation est comparable à celle rencontrée classiquement dans l'étude des réseaux de diffraction : la convolution d'un réseau de Dirac et du profil d'un sillon peut décrire le profil du réseau, et la figure de diffraction monochromatique est donc le produit d'une fonction d'interférence et d'une fonction de diffraction.

Si l'objet observé dans notre cas comporte plusieurs sources ponctuelles ou est étendu, la relation classique de convolution décrivant la formation de l'image s'applique encore à la fonction d'interférence : celle-ci est convoluée avec la fonction objet. Mais il faut, pour obtenir l'image, multiplier de surcroît le résultat par l'enveloppe de diffraction, laquelle est peu affectée par la présence d'un objet étendu si le réseau est dilué et l'objet petit.

Les propriétés de la recombinaison à pupille densifiée sont telles que, compte tenu du bruit de photons, l'image d'une planète semblable à Jupiter et qui serait située à 5 pc pourrait être obtenue avec 20 x 20 éléments résolus (Labeyrie, 1996). Dans l'espace, cela nécessiterait une base de 10 km, mais l'observation est en principe possible également au sol avec de telles bases, en utilisant 27 télescopes de 10 m cophasés.

Pour d'aussi grandes bases, notamment au sol, les systèmes de recombinaison à fibres optiques peuvent devenir intéressants, s'ils permettent entre autres d'égaliser les chemins optiques par étirement des fibres (Coudé du Foresto et al., 1997). A la sortie des fibres, il reste possible d'obtenir des images directes selon la théorie précédemment mentionnée, en rassemblant les sorties des fibres de façon à reproduire une version densifiée de la pupille, et en superposant sur le détecteur les faisceaux divergents qui en proviennent. Il serait intéressant d'essayer cette configuration avec un montage de simulation.

2. Vers un réseau interférométrique de grands télescopes

Après les petits interféromètres prototypes, l'Interféromètre à deux télescopes de Calern et le Mark III du mont Wilson, il y eut le GI2T (Grand Interféromètre à deux Télescopes), avec ses deux télescopes de 1,5 m. Grâce à la combinaison unique de résolution spectrale et spatiale qu'il apporta, il a commencé à produire de nouvelles formes de science entre les mains de D. Mourard, F. Vakili, D. Bonneau et leurs collaborateurs.

Il y aura peut-être le VLTI (Very Large Telescope Interferometer), que l'on espère voir fonctionner efficacement. J'avais proposé en 1977 de relier interférométriquement les grands télescopes à venir (Labeyrie, 1977), mais suis étranger aux concepts pratiques mis en oeuvre par l'Observatoire Européen Austral pour le couplage interférométrique des quatre télescopes de 8 m et des trois télescopes plus petits qu'il construit au Chili (von der Lühne, 1995). A Hawaii, les deux télescopes Keck de 10 m doivent également être munis de télescopes plus petits et fonctionner en interférométrie.

Il y aura encore peut-être le Optical Very Large Array, un interféromètre modeste par la taille de ses miroirs de 1,5 m, mais ambitieux par sa capacité d'imagerie instantanée, bénéficiant de ses 27 télescopes et de l'imagerie directe à pupille densifiée. En outre, le moment semble venu de concevoir un grand "télescope interférométrique dilué", possédant quelques douzaines d'ouvertures, larges d'une dizaine de mètres, et posées sur une plate-forme de plusieurs kilomètres (*fig. 2*).

En présence d'optique adaptative corrigeant les télescopes d'un interféromètre, et égalisant aussi les chemins optiques, la mise en phase intra- et interouvertures peut être obtenue sur des objets brillants non résolus. Sur des objets faibles, les techniques d'étoile artificielle laser pourront vraisemblablement permettre la mise en phase intra-ouvertures. Avec des dimensions de 8 m ou plus, l'intensité centrale s'en trouve augmentée 10 000 fois environ, ce qui améliore de dix magnitudes (ou plus) la limite atteignable pour la mise en phase interouvertures. En attendant la construction de grands interféromètres dans l'espace, ce gain devrait permettre l'imagerie interférométrique dans le visible au-delà de la magnitude $m_V = 25$. Il y a donc beaucoup à gagner à utiliser de grands télescopes pour l'interférométrie au sol.

Avec un certain nombre de collègues de différents observatoires, nous avons commencé à étudier un tel interféromètre, qui comporterait quelques dizaines de télescopes de 10 m, mobiles sur une plate-forme de 5-10 km. Conçu pour l'imagerie instantanée à haute résolution, il aurait la capacité théorique de former des images résolues de planètes extra-solaires, et de nombreux autres objets plus faciles. Les progrès actuels en matière d'optique active et de miroirs

mosaïques, permettent d'alléger les télescopes, et leur coût, bien au-delà de ce qui a été obtenu pour les Keck.

Un miroir actif de 1,5 m, en verre ordinaire épais de 25 mm, fait actuellement l'objet d'essais à l'Observatoire de Haute-Provence (Arnold *et al*, 1997). La mise en mosaïque d'éléments identiques, hexagonaux, est envisageable pour obtenir de grandes mosaïques 20 fois moins coûteuses et trois fois plus légères que celles, semi-actives, du Keck. Des configurations optiques nouvelles à quatre miroirs, dont le primaire est sphérique, ont été étudiées par A. Baranne (1997) et par G. Lemaître (1997) pour des télescopes de 10-15 m, voire 25 m.

Des montures sphériques, plus compactes et légères que les montures alt-azimuthales, sont également étudiées. Formées de poutrelles modulaires, utilisables sans coupoles, compatibles avec la mobilité souhaitable pour reconfigurer les bases interférométriques, et égaliser en première approximation les chemins optiques pendant l'observation, ces montures pourraient aussi abaisser les coûts de fabrication.

3. Dimension limite des miroirs à monture unique

Le projet suédois, dont l'étude est très avancée, d'un télescope de 25 m, démontre la faisabilité de telles structures. Mountain (1997) compare la science que produiraient un télescope de 50 m unique et un télescope dilué, réseau de quelques dizaines de télescopes de 8 m espacés de plusieurs kilomètres. A superficie de miroirs égale, la science est évidemment beaucoup plus riche pour le réseau dilué, d'autant plus que ses éléments peuvent être rapprochés, dans les cas où cela serait utile.

Jusqu'où peut-on espérer agrandir les miroirs portés par une monture unique ? Les grands radio-télescopes, dont le miroir est formé d'une mosaïque légère de tôles ou de grillages, ont atteint des dimensions de l'ordre de 100 m, ce qui laisse espérer des dimensions comparables pour des miroirs optiques très minces, portables par une seule monture. R. Angel et ses collaborateurs (1997) à l'université d'Arizona proposent un miroir de 6 m, épais de 2 mm, pour le successeur du télescope Hubble. Des miroirs aussi minces pourraient devenir utilisables au sol, avec des actuateurs espacés de quelques centimètres et capables de contrer les efforts dus au vent.

Conclusions

Les progrès de l'interférométrie depuis Fizeau nous amènent aujourd'hui à un stade où elle sort de son enfance et devient utilisable à grande échelle. L'optique dite "vivante", parce qu'utilisant des asservissements plutôt que des structures massives pour maintenir la mise en phase de la lumière, apporte des possibilités nouvelles spectaculaires, qu'illustre par exemple le projet suédois d'un télescope de 25 m. Cela rend envisageable la construction, pour un coût modéré, de très grands instruments regroupant des dizaines de grands télescopes. La science qu'ils rendent possible concerne les objets les plus faibles observés jusqu'ici du sol, avec la possibilité d'images ayant la résolution de $10 \mu''$. Dans l'espace, la magnitude limite et la résolution pourront être encore améliorées.

Références bibliographiques

- Angel, R. 1997.** Proposition à la NASA.
- Arnold, L., Berger, J.-P., Cazalé, C., Dejonghe, J., Dutertre S., Kohler, D. Labeyrie, A., Lardière, O., Mourard, D., Vernet, D. 1997.** The Optical Very Large Array: a status report on the construction of the prototype 1.5-m telescope. en préparation.
- Baranne, A., 1997.** Communication privée.
- Coudé du Foresto, V., Ridgway, S. and Mariotti, J. -M. 1997.** Deriving object visibilities from interferograms obtained with a fiber stellar interferometer. *A & A Suppl. Ser.* 121, p. 379-392
- Labeyrie A., 1978.** Coherent arrays, p. 375-385. in *Optical Telescopes of the Future, Proc. ESO conf.* Geneva, **Pacini F., Richter W., Wilson R.N.** ed.
- Labeyrie A., 1996.** Resolved imaging of extra-solar planets with future 10-100 km optical interferometric arrays. *A & A. Suppl. Ser.* 118, p. 517-524
- Lemaître, G. , 1997.** Communication privée.
- Mountain M., 1997.** What is beyond 8m-10m class telescopes and the VLTI: very large imaging array for ground based infrared and optical astronomy ? p. 597-606. in *Optical telescopes of today and tomorrow*, Landskrona, SPIE Proc. Vol. 2871, **Ardeberg A.** ed., SPIE, Bellingham.
- Tallon M. et Tallon-Bosc I., 1992.** The object-image relationship in Michelson stellar interferometry. *A & A* 253, p. 641-645.
- von der Lühe, O., Schüssler, M., Solanki, S.K., Caligari, P. 1995.** Observation of surface activity on cool giants with the VLT interferometer. p. 94-99. in *Science with the VLTI*, European Southern Observatory Workshop, **Walsh J. R., Danziger I. J.** eds., Springer, Berlin.

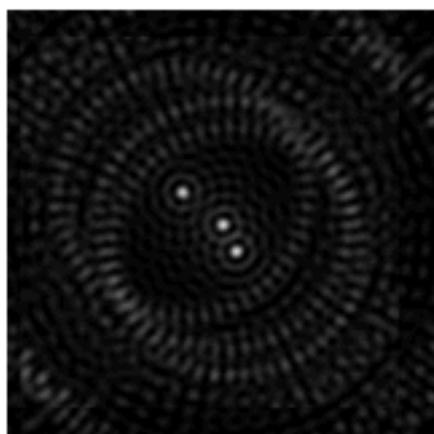
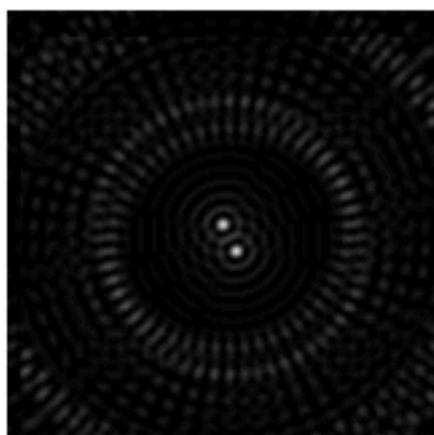
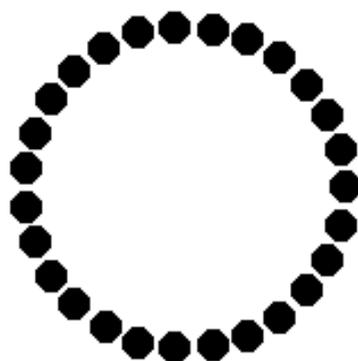
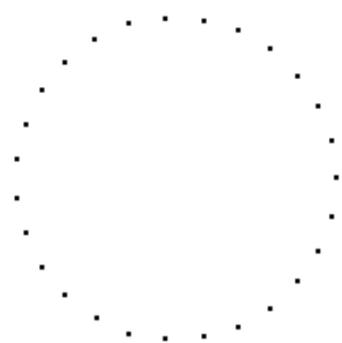


Fig. 1.- Simulation d'images stellaires obtenues avec un interféromètre dilué à 27 ouvertures, directement au foyer recombinaison. En haut : pupille d'entrée en anneau dont le diamètre est 100 fois celui des ouvertures (gauche), pupille de sortie densifiée (milieu), et image recombinaison en mode Fizeau cophasé d'une étoile ponctuelle (droite). Lignes suivantes : cas d'une étoile double, triple, sextuple, imagerie à recombinaison Fizeau (gauche) et recombinaison Michelson avec la pupille densifiée (droite). Les images de droite sont intensifiées d'un facteur 10 000, car l'enveloppe de diffraction rétrécie concentre l'énergie éparpillée dans le halo de pics secondaires, mais le champ est décroissant.

Fig. 1.- Simulation of stellar images obtained with a diluted interferometric array having 27 phased apertures, directly at the recombined focus. Top: entrance pupil with subapertures 100 times smaller than the ring (left), densified exit pupil (middle), and recombined image of a point source in the Fizeau mode (right). Following lines: cases of double triple and sextuple star with Fizeau (left) and densified pupil (right) recombination. The images on the right are intensified 10 000 times, or blazed, because the shrunk diffraction envelope concentrates the energy from the halo of sidelobes, but the field extent is decreased.

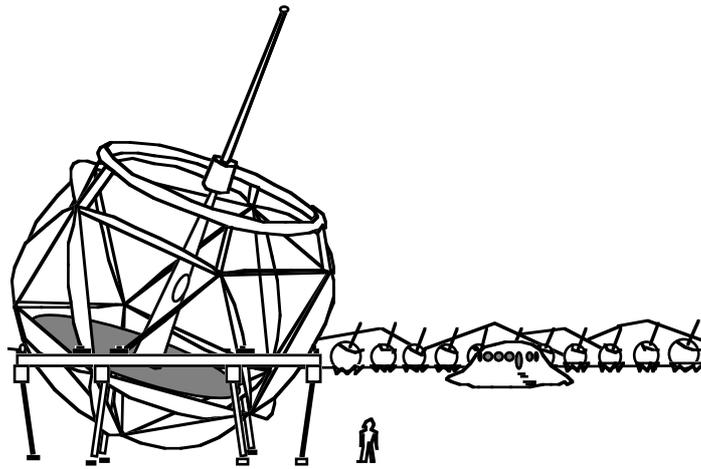


Fig. 2.- Principe d'un réseau de 27 télescopes de 10 m. Selon l'étude en cours à l'Observatoire de Haute-Provence, chaque télescope aurait un miroir mosaïque actif sphérique et une monture sphérique. La forme du miroir primaire est contrôlée au centre de courbure, grâce à un pylône portant une source laser.

Fig. 2.- Principle of a 27-element optical array with 10m telescopes. According to a study under way at Haute Provence observatory, each telescope has a spherical primary mirror, with an active mosaic structure, and a spherical mount. The shape of the large mirror is controlled at the curvature center with a laser source carried by a pole.