

## **Astrophysique observationnelle**

M. Antoine LABEYRIE, professeur

Cours : *Vers l'observation optique à haute résolution*

Le cours entamé au printemps 1991 a été consacré aux progrès actuels et prévisibles de l'observation astronomique, notamment aux longueurs d'ondes visibles et infra-rouges proches.

La grande nouveauté actuelle est l'émergence des méthodes interférométriques. Elles permettent de construire des systèmes formés de plusieurs télescopes, dont la résolution angulaire équivaut à celle qu'auraient des télescopes géants, possédant une ouverture de plusieurs dizaines ou centaines de mètres.

### *1. Les bases de l'interférométrie stellaire*

La notion de cohérence dans les champs vibratoires, notamment électromagnétiques, peut être interprétée en termes de « tavelures ». Il s'agit des distributions de vibrations d'apparence chaotique, dans l'espace et dans le temps, qui se forment lorsque plusieurs sources contribuent au champ vibratoire. Le phénomène existe aussi bien pour les ondes acoustiques, les vagues océaniques, que les ondes électromagnétiques ou gravitationnelles. Les fonctions d'onde de la mécanique quantique n'ont jusqu'ici guère pris en compte cette forme de chaos. Mais elles ne semblent pas elles-mêmes à l'abri d'une description en terme de tavelures pour décrire des structures moléculaires ou pseudo-cristallines complexes.

L'observation, très facile, de tavelures produites par les lasers suggère un modèle simple pour la lumière nous parvenant d'une étoile : l'étoile est équivalente à un laser muni d'un diffuseur aléatoire, spatialement et temporellement. L'atmosphère terrestre est un second diffuseur aléatoire, situé beaucoup plus près de l'observateur.

Ce second diffuseur étant d'abord négligé, le modèle montre que l'éclaircissement du sol est tavelé. L'étendue spatiotemporelle des tavelures est détermi-

née par la distribution spatio-temporelle d'intensité sur la source, c'est-à-dire la forme apparente de l'étoile et son spectre.

Une interprétation simple de la méthode interférométrique de Hanbury Brown et Twiss, aussi nommée interférométrie d'intensité, découle de ce modèle : les fluctuations de l'intensité mesurée en plusieurs points de la surface terrestre sont corrélées s'ils sont situés à l'intérieur d'un speckle, et décorrélées dans le cas inverse.

Pour l'interférométrie directe, le modèle conduit aux conclusions classiques établies par ZERNIKE : en lumière quasi-monochromatique, la visibilité des franges est définie par la transformée de Fourier de la fonction objet.

Le principe de ce que les radioastronomes ont imaginé sous le nom de synthèse d'ouverture s'applique aussi aux observations optiques avec une ouverture multiple.

## 2. *Quelques projets interférométriques actuels*

Les opticiens parviendront-ils à pousser aussi loin la synthèse d'ouverture que leurs collègues radio-astronomes ? Ces derniers obtiennent des résultats inespérés, des images d'une qualité remarquable, avec le réseau à 27 antennes du Nouveau Mexique.

Les opticiens FIZEAU et MICHELSON furent les premiers à exploiter l'interférométrie, mais la précision géométrique extrême nécessaire pour les interféromètres ne pouvait être atteinte avec les moyens de l'époque. La turbulence de l'atmosphère était également un sérieux problème qui semblait empêcher l'utilisation de grandes ouvertures. Ces difficultés commencent à être surmontées, et les plus grands projets de télescopes optiques incorporent maintenant des modes interférométriques. Il en est ainsi pour le Very Large Telescope européen et pour le Keck Telescope américain.

Mais ces grands instruments en sont encore à peu près au stade des « voitures sans cheval », ces ancêtres de l'automobile qui possédaient déjà le moteur mais conservaient la forme d'une voiture à cheval. Ni le V.L.T. ni le Keck ne sont vraiment conçus pour l'observation à haute résolution. Pour obtenir des images à haute résolution de façon instantanée, ce qui est souhaitable étant donné la variabilité rapide de nombre d'objets à l'échelle spatio-temporelle considérée, il est important d'utiliser un grand nombre d'ouvertures. Et cela semble plus rentable qu'un petit nombre de grandes ouvertures. Ainsi, une centaine de télescopes de 1 m 50 concurrenceraient avantageusement les quatre télescopes de 8 m du V.L.T.

Dans un premier temps, le projet de « Optical Very Large Array » ou Très Grand Réseau Optique comporte déjà 27 télescopes de 1 m 50. Il est conçu pour produire des images instantanées à haute résolution. La fonction d'éta-

ment instantanée, corrigée de la turbulence, présente un pic étroit susceptible de fournir des images directes sur des objets complexes.

Une version nommée « Lunar Optical Very Large Array » a été proposée aux agences spatiales. Il se trouve en effet que la conception modulaire des télescopes OVLA, équipés de pattes robotiques pour se déplacer de façon autonome, est adaptée aux sites lunaires, particulièrement si le déploiement doit être fait sans intervention humaine. Des bases couvrant une dizaine de kilomètres semblent possible, et cela permettrait de résoudre angulairement quelques détails à la surface d'éventuelles planètes associées aux étoiles proches du soleil.

### 3. *La stabilisation adaptative des interféromètres*

Un système interférométrique à  $N$  télescopes est équivalent à un télescope géant dont l'ouverture serait masquée par endroits. Au foyer commun, il faut que les contributions des différentes sous-ouvertures soient bien superposées, ce qui nécessite un guidage précis des télescopes. Mais il faut aussi satisfaire les tolérances habituelles sur la mise en phase. RAYLEIGH énonça que les erreurs de phase doivent rester inférieures à  $90^\circ$ , et MARÉCHAL applique la même limite à l'écart type de la phase.

La mise en phase de ces télescopes multiples est difficile mais hautement souhaitable car elle engendre, dans le cas des OVLA et LOVLA, un pic central brillant dans la fonction d'étalement. Des étoiles de référence artificielles peuvent faciliter cette mise en phase dans le premier cas. Dans l'espace, l'information sur la géométrie de l'instrument que peuvent donner des canaux d'interférométrie par laser peut être complétée par l'observation d'une étoile de référence en même temps que l'objet principal. La précision requise pour mettre en phase les éléments implique des tolérances de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres sur la position de certains composants optiques, et les déformations du sol doivent être prises en compte.

Sur Terre, il faut en outre compenser les défauts optiques fluctuants qu'introduit l'atmosphère. Des systèmes optiques adaptatifs peuvent y parvenir, à condition que les défauts de l'onde puissent être cartographiés en un temps plus court que leur durée de vie, soit quelques millisecondes en pratique. Décrits dès les années 1950 par H. BABCOCK, de tels systèmes adaptatifs ont été expérimentés récemment par une équipe française sur des télescopes monolithiques. Les résultats sont fort encourageants et montrent que l'effet optique de la turbulence atmosphérique peut être en grande partie compensé, tant sur les télescopes que sur les interféromètres.

Cependant, la méthode adaptative ne paraissait pas utilisable sur les étoiles faiblement lumineuses, car la cartographie rapide de l'onde nécessite un débit de photons élevé. Des magnitudes limites de l'ordre de 10 à 12 sont habituellement citées. Peu d'objets faibles bénéficient de la présence d'une étoile

suffisamment brillante dans le champ proche, et qui puisse être utilisée pour corriger les ondes correspondantes.

C'est pourquoi FOY et LABEYRIE proposèrent en 1985 d'engendrer une étoile de référence artificielle en émettant à partir du télescope des impulsions laser. Une faible proportion de la lumière laser est rétrodiffusée par la haute atmosphère. Et l'on peut s'en servir pour diagnostiquer la basse atmosphère, dont l'effet est dominant. Des essais de ce type ont été entamés en France, mais il a été révélé, après la fin du cours effectué au printemps, que des recherches analogues, couvertes par le secret militaire, auraient été entamées aux Etats-Unis depuis 1982. L'optique adaptative intéressait en effet les constructeurs militaires d'armes laser. Selon le point de vue militaire, il fallait que la tache lumineuse reçue par la cible soit la plus concentrée possible, et donc utiliser une optique adaptative activée par la lumière rétrodiffusée provenant de la cible, technique proche de celle qui consiste à utiliser la lumière laser rétrodiffusée par l'atmosphère pour observer un objet astronomique.

L'activation d'un miroir déformable, servant à corriger la turbulence atmosphérique, à partir de l'image dégradée a d'abord été effectuée à l'aide de processeurs numériques programmés. Mais il s'avère que des réseaux neuro-naux artificiels semblent bien adaptés à cette tâche. On peut y voir un bel exemple de convergence de la technique vers les processus biologiques naturels qui adaptent la forme du cristallin dans l'oeil des animaux évolués et de l'homme.

Ces techniques d'optique adaptative n'ont pas encore été appliquées au cas de télescopes multiples pour l'interférométrie. Sur une étoile brillante, elles permettent de stabiliser les franges d'interférence. Sur une étoile faiblement lumineuse, le principe d'une étoile artificielle formée par rétrodiffusion de faisceau laser est de mise en œuvre difficile. Cependant, l'utilisation de multiples faisceaux laser pourrait peut-être permettre de cartographier l'indice de réfraction dans l'atmosphère en utilisant le principe de la tomographie. L'effet des grandes cellules turbulentes dans les basses couches nécessiterait cependant des faisceaux laser très obliques pour être détecté. Les meilleurs compromis possibles sont pour l'instant difficiles à préciser, de sorte que l'on peut difficilement prévoir les limites ultimes de l'optique adaptative dans le cas des interféromètres. Or ces limites concernent aussi l'importance plus ou moins grande qui doit être attachée à la construction d'interféromètres dans l'espace. Les progrès actuels montrent cependant qu'une percée majeure est entamée dans le domaine de l'observation optique.

#### 4. Résultats de l'interféromètre GI2T

Le GI2T est le premier instrument capable d'observer avec une résolution spatiale approchant la milliseconde d'arc et une résolution spectrale approchant l'angstrom.

L'étoile gamma Cassiopée a été particulièrement observée parce qu'elle comporte vraisemblablement une enveloppe en forme de disque, de forme variable. Un modèle détaillé a été proposé par POECKERT et MARLBOROUGH sur la base des observations spectroscopiques effectuées depuis un siècle.

D'autres modèles moins détaillés ont aussi été proposés. Les premières observations interférométriques montrent une assez bonne compatibilité avec le modèle de POECKERT et MARLBOROUGH. Elles constituent la première observation directe d'une enveloppe en rotation. Les améliorations en cours de l'instrument doivent permettre dans l'avenir des observations plus précises.

A.L.

#### SÉMINAIRES

Les cinq séminaires organisés au Collège de France et à l'Université de Nice ont été consacrés à divers aspects actuels de l'observation astronomique.

H. REEVES (C.E.A., Saclay), La pathologie du Big Bang.

P. CONNES (Service d'Aéronomie, C.N.R.S., Verrières-le-Buisson), Interféromètre à fibres optiques.

F. VAKILI (Observatoire de la Côte d'Azur), Sismologie stellaire et haute résolution optique.

S. GUILLOTEAU (Institut de Radioastronomie Millimétrique, Grenoble), Résultats récents de l'interféromètre millimétrique du Plateau de Bures.

L. KOEHLIN (Observatoire du Pic du Midi et de Toulouse), Le mode interférométrique du Very Large Telescope.

#### ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES

A. LABEYRIE anime le groupe qui travaille sur le Grand Interféromètre à deux Télescopes implanté à l'observatoire de Calern dans les Alpes-Maritimes. Le groupe rassemble une dizaine d'astronomes qui exploitent les nouvelles possibilités observationnelles apportées par cet instrument, encore unique en son genre. Il prépare aussi la construction des futures versions, au sol et dans l'espace, qui comporteront davantage de télescopes pour parvenir à reconstruire des images à haute résolution.

1. *Observations interférométriques* (D. MOURARD, F. MORAND, I. PERCHERON, F. VAKILI, D. BONNEAU, L. KOEHLIN, I. TALLON-BOSC)

On a poursuivi le programme d'observations avec le Grand Interféromètre à 2 Télescopes (GI2T). Des spectres frangés ont été enregistrés cette année sur

les étoiles beta Lyre, gamma Cassiopée et P Cygne notamment. Leur analyse n'est pas encore terminée à ce jour. De nombreuses améliorations ont aussi été apportées au système.

2. *Construction d'un troisième télescope* (A. LABEYRIE, C. CAZALÉ, Lixin XIA, D. VERNET)

Par ailleurs, l'équipe a entrepris la réalisation d'un troisième télescope qui est conçu pour être le prototype des 27 télescopes qui constitueront le réseau OVLA. Avec la collaboration de l'Observatoire de Haute-Provence, du Laboratoire d'Astronomie Spatiale, et du Laboratoire d'Intelligence Artificielle et de Robotique (Paris VII), des éléments de ce télescope sont en construction. Après des essais qui ont qualifié le nouveau type de monture, la construction d'un miroir mince actif est entamée.

Une optique adaptative, destinée à corriger l'effet de la turbulence atmosphérique sur l'interféromètre GI2T, améliorerait d'un facteur 100 la concentration de la lumière au foyer de cet instrument. Il devient possible de construire un tel accessoire adaptatif, et le projet est en cours de définition.

3. *Système de métrologie tridimensionnelle absolue par laser* (Shoushen GONG, F. MORAND)

Ce système doit permettre de contrôler la géométrie du Optical Very Large Array en mesurant avec une précision de quelques microns les positions des télescopes mobiles sur une plateforme de 600 m. Un prototype construit sur l'un des télescopes existants a donné cette année des résultats qui semblent indiquer la viabilité du principe retenu. Le système semble utilisable pour d'autres applications.

4. *Projet d'interféromètre orbital ou lunaire* (A. LABEYRIE)

Le projet de Lunar Optical Very Large Array proposé à l'Agence Spatiale Européenne (A.S.E.) est en cours d'évaluation par l'agence concernée et par le C.N.E.S. Le professeur participe aux travaux du Lunar Interferometry Study Team de l'A.S.E., et à ceux du groupe de travail constitué par le C.N.E.S.

#### COLLABORATIONS INTERNATIONALES

Des séjours d'un an de plusieurs ingénieurs chinois au laboratoire, après une visite effectuée en Chine par A. LABEYRIE, ont amorcé une collaboration en matière d'interféromètres. Une concertation est également maintenue avec des astronomes soviétiques.

La construction d'une caméra est l'occasion d'une collaboration étroite avec le Space Telescope Science Institute à Baltimore.

## PUBLICATIONS DU LABORATOIRE

LABEYRIE A., 1991, « Of Speckles, Fringes, and an Optical Very Large Array », Comments in Astrophysics (sous presse).

GONG Shoushen, MOURARD D., MORAND F. et LABEYRIE A., 1991, « The tri-dimensional absolute laser metrology system for the Optical very Large Array », NOAO/ESO conf. Garching (en préparation).

LABEYRIE A., Ecosystems as neural networks, in « Frontiers of Life », conf. proc., Blois, 1991.

LABEYRIE A., 1991, Construction of Optical Very Large Array elements, ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

LABEYRIE A., 1991, Estimates of Gravitational « Seeing » ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

TALLON-BOSC I. et TALLON M., For Imaging an Extended Object : is the absence of a convolution relationship for a Michelson stellar interferometer really a problem ? ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

DI BENEDETTO P., Effective temperature calibration for Cool Supergiants and Giants from Near-Infrared Michelson Interferometry at the I2T. ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

MOURARD D., 1991, Status and Results report on GI2T, ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

PERCHERON I., 1991, Fringe Detection and its Application on the GI2T. ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

MORAND F., 1991, Status of the GI2T Tri-dimensional Absolute Laser Metrology System. ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

KOECHLIN L., Active tracking for Multi-telescope interferometers. ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

VAKILI F. and PERCHERON I., Beam Combination and Coherence tracking with diluted interferometers. ESO conf. on High-resolution imaging by Interferometry II, Garching oct. 91.

## CONFÉRENCE SUR INVITATION

« Tinsley Prize Lecture », 177<sup>e</sup> congrès de la American Astronomical Society, Philadelphia, jan. 1991.

## DISTINCTION

Le Professeur a reçu le prix Tinsley de la American Astronomical Society en janvier 1991.