

## **Astrophysique observationnelle**

M. Antoine LABEYRIE, membre de l'Institut  
(Académie des Sciences), professeur

### **I. Cours et séminaires**

Trois cours concernant la détection des exo-planètes ont d'abord été donnés à l'Université de Nice-Sophia-Antipolis, dans le cadre d'une école sur l'Imagerie à Très Haute Dynamique. Un nouveau moyen de pousser la sensibilité des coronographes, à un niveau suffisant pour espérer détecter des exo-Terres, y a notamment été décrit. Il s'agit d'utiliser un hologramme pour détruire interférentiellement la lumière résiduelle de l'étoile.

Les cours suivants, au Collège de France, ont porté à nouveau sur les hypertélescopes, et notamment les premières observations d'interférences effectuées avec l'instrument en construction à l'Observatoire de Haute Provence.

### **II. Activités de recherche du Laboratoire d'Interférométrie Stellaire et Exo-planétaire (LISE)**

Le groupe de recherche LISE associé à la chaire d'Astrophysique Observationnelle, dans le cadre d'une formation CNRS (FRE 2215) est hébergé à l'Observatoire de Haute Provence et à l'Observatoire de la Côte d'Azur. Avec cet observatoire, l'observatoire de Marseille et le Laboratoire d'Astronomie Spatiale, elle constitue l'Observatoire Astronomique Marseille-Provence, associé à l'Université de Provence. Cependant, l'intégration du LISE dans l'UMR Gemini de l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) est actuellement envisagée pour formaliser la collaboration amorcée dans le but d'implanter un hypertélescope Carlina sur son site de Calern.

Le personnel du LISE comporte, au 1<sup>er</sup> septembre 2004, Ralph Krikorian (Maitre de Conférences au Collège de France), Cristina Arpesella (ATER du Collège de France), Julien Dejonghe (technicien Collège de France), David Vernet (adjoint Technique Collège de France), Virginie Borkowski (ATER Collège

de France), Olivier Lardière (Maitre de Conférence Collège de France). Le LISE accueille actuellement trois doctorants : Sophie Gillet, qui est également professeur agrégé de physique, Frantz Martinache (boursier BDI), et Marc Guillon (boursier normalien) ainsi qu'un agent administratif, Vanessa Olivo (emploi jeune).

Ettore Pedretti, a soutenu sa thèse, effectuée en co-direction à l'Université de Harvard, à l'Observatoire de Haute Provence en novembre 2003 et entamé un séjour post-doctoral à l'Université du Michigan. Virginie Borkowski a soutenu sa thèse en juin 2003.

Hervé Le Coroller entame un séjour post-doctoral au Keck Telescope (Hawaii).

D. Peterson, professeur à State University of New York, Stony Brook, et Jean Schneider à l'Observatoire de Meudon, ont activement contribué aux projets du LISE, en leur qualité de chercheurs associés.

**Construction d'un hypertélescope Carlina** (H. Le Coroller, J. Dejonghe, D. Vernet, F. Martinache, C. Arpesella, A. Labeyrie)

La construction d'un prototype d'hypertélescope de type Carlina, c'est-à-dire utilisant un miroir sphérique dilué, a été entamée à l'Observatoire de Haute Provence. L'intérêt du concept est de permettre l'utilisation d'ouvertures nombreuses, et donc l'obtention d'une image instantanée riche en information. De premières interférences ont été obtenues sur l'étoile Véga au printemps.

Les enregistrements ont confirmé les avantages pratiques espérés avec l'architecture Carlina, dont le nom est emprunté à une fleur composée : les interférences peuvent être acquises et conservées pendant une heure ou plus de façon beaucoup plus aisée qu'avec les interféromètres classiques. La simplification optique, mécanique et électronique qu'apporte cette architecture est obtenue au prix des acrobaties qu'implique la poursuite de l'image stellaire par une caméra suspendue à un ballon captif. Le risque était de ne pas parvenir à stabiliser la nacelle avec une précision suffisante. Mais une précision meilleure que le millimètre a été atteinte, et l'emploi d'asservissements devrait ultérieurement permettre de l'améliorer encore.

Il est maintenant envisagé de déménager l'instrument sur le site de Calern, dans une doline proche du Grand Interféromètre à Deux Télescopes (GI2T). Sa topographie permet en principe d'y constituer une ouverture diluée comportant une ou plusieurs dizaines de miroirs, dont la dimension globale peut atteindre 40 à 60 mètres. Des dimensions atteignant 1 500 m pourraient à terme être envisagées en utilisant de grands cratères ou des vallées profondes.

Des dimensions bien supérieures pourront être atteintes dans l'espace avec ce type d'architecture, notamment sous la forme d'une bulle optique diluée dont le diamètre pourrait atteindre des centaines de kilomètres, et des centaines de milliers de kilomètres lorsqu'il s'agira d'observer des étoiles à neutrons. Ces deux

versions, qui permettront en principe de résoudre respectivement les détails d'exo-Terres et d'étoiles à neutron comme le pulsar du Crabe, ont été proposées aux agences spatiales sous les noms de « Exo-Earth Imager » et « Neutron Star Imager ». La faisabilité d'une version basée dans un cratère de la Lune, utilisant une caméra satellisée, a aussi été étudiée, de façon très préliminaire. Elle a fait l'objet de calculs orbitaux par J. Chambre, et d'une présentation invitée au colloque du COSPAR.

### **Analyse d'onde pour ouvertures diluées par « tavelures dispersées »**

(V. Borkowski, F. Martinache, D. Peterson, A. Labeyrie)

Cette méthode a été récemment proposée dans le but de permettre la mise en cohérence active, et la mise en phase adaptative, d'interféromètres à ouvertures multiples. Les méthodes utilisées pour les télescopes monolithiques, par analyse des pentes ou des courbures sur l'onde, ne conviennent pas lorsque l'onde est segmentée.

L'étude et la mise au point de la méthode des « tavelures dispersées », qui ont fait l'objet de la thèse de V. Borkowski, ont été poursuivis au moyen de simulations numériques et d'un montage de laboratoire. Il s'agit maintenant de construire un instrument utilisable sur différents interféromètres, notamment le CARLINA, mais aussi l'interféromètre VLTI de l'ESO. Il s'agit aussi d'étudier dans quelle mesure la méthode pourrait servir pour les miroirs mosaïques des « Extremely Large Telescopes » (ELT). L'ESO a proposé une collaboration pour étudier le fonctionnement en mode hypertélescope de son « Overwhelmingly Large Telescope » (OWL) pendant le stade transitoire où la monture ne sera que partiellement garnie des milliers de miroirs qui composent la mosaïque, qu'étudie l'ESO. Ce mode transitoire pourrait utiliser un analyseur à tavelures dispersées, lequel pourrait rester intéressant lorsque le miroir sera complet s'il permet d'économiser les « senseurs de bord » qui mesurent le décalage axial des segments de miroirs.

### **Coronographie des exo-planètes et recherche de vie extra-solaire**

(A. Labeyrie, H. Le Coroller, F. Martinache, en collaboration)

Séparer optiquement des exo-planètes de leur étoile mère, parvenir ensuite à en obtenir des images résolues, montrant leurs continents, et permettant d'y rechercher des signes de vie, sont des objectifs qui deviennent en principe atteignables avec les hypertélescopes. Une première étape consiste à améliorer les coronographes qui rejettent la lumière de l'étoile mère. Une voie nouvelle étudiée cette année utilise la soustraction cohérente de cette lumière, par une méthode interférométrique utilisant un hologramme. Cette voie permet en principe un meilleur nettoyage que la soustraction incohérente, envisagée par différents auteurs depuis la proposition soumise à la NASA en 1974 par A. Labeyrie pour le télescope Hubble. On montre en effet que le résidu peut être de l'ordre de un

photon par tavelure, et encore moins si une étoile artificielle est observée pour enregistrer l'hologramme. Ce niveau est compatible avec la détection de l'image d'une planète, comportant nécessairement plusieurs photons.

Le principe a fait l'objet de simulations numériques par H. Le Coroller et d'un début de montage par F. Martinache.

**Miroirs piégés par laser** (M. Guillon, A. Labeyrie, en collaboration avec R.V. Stachnik et J.M. Fournier)

La perspective de miroirs dans l'espace, obtenus par cette méthode que proposa A. Labeyrie en 1978, a fait l'objet d'une étude financée par la NASA en 2002. M. Guillon a souhaité y consacrer sa thèse entamée à l'Observatoire de Haute Provence. Il a entamé des calculs et des essais préliminaires en laboratoire pour explorer les différentes possibilités de réalisation d'un essai dans le vide.

**Astrophysique théorique et relativité générale** (R. Krikorian)

R. Krikorian a continué l'étude de certains problèmes d'hydrodynamique relativiste et de supraconductivité.

#### A. Hydrodynamique

Un théorème bien connu affirme que les lignes de courant d'un fluide parfait isentropique sont les lignes de courant orientées dans le temps réalisant l'extremum de la fonctionnelle  $J$ , intégrale de la fonction d'indice  $F$ , pour des variations à extrémités fixes. Il a montré que les lignes de courant d'un fluide parfait adiabatique, fluide pour lequel l'entropie est seulement constante sur chaque ligne de courant, peuvent être considérées comme des extrémales de cette même fonctionnelle  $J$  si l'on considère le problème d'extremum comme un problème de Lagrange à une extrémité variable, les courbes admissibles étant assujetties à vérifier l'équation différentielle exprimant la constance de l'entropie  $S$  le long de la ligne de courant. Ce travail a fait l'objet d'un article soumis à la revue *Nuovo Cimento B*.

#### B. Supraconductivité

En collaboration avec D. Sedrakian, R. Krikorian a obtenu un système d'équations aux dérivées partielles pour la détermination du champ électrique et du paramètre d'ordre. Ils étudient à présent les supraconducteurs en rotation en adoptant la méthode des repères anholonomiques. Cette méthode a été utilisée par certains théoriciens pour interpréter les phénomènes électromagnétiques dans les référentiels en rotation. R. Krikorian a montré que l'existence des champs électrique et magnétique dans un supraconducteur en rotation peut s'interpréter comme un effet électromagnétique de l'anholonomie. Ce travail est en cours de rédaction. Il travaille à la formulation de l'électrodynamique dans les supraconducteurs en rotation en adoptant l'approche anholonomique.

## Publications

### Articles publiés dans des journaux à comité de lecture :

Martinache, F., « Global wavefront sensing for interferometers and mosaic telescopes : the dispersed speckles principle », *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* 6, 216-220, 2004.

Le Coroller, H., Dejonghe, J., Arpesella, C., Vernet, D. & Labeyrie, A., « Tests with a Carlina-type hypertelescope prototype : demonstration of star tracking and fringe acquisition with a balloon-suspended focal camera », *A&A*, **426**, 721-728, 2004.

Borkowski, V., Labeyrie, A., Martinache, F., Peterson, D., « Sensitivity of a “dispersed-speckles” piston sensor for multi-aperture interferometers and hypertelescopes », *A&A*, **429**, 747B, 2005.

Labeyrie, A. & Schneider, J., « Hypertelescopes on the Moon and the search for living exoplanets », *Advances in Space Research*, 2004 (en préparation).

Sedrakian, D.M. & Krikorian, R.A., « A note on relativistically rotating superfluid », *Nuovo Cimento B* 118, 579, 2003.

Sedrakian, D.M. & Krikorian, R.A., « A note on time independent electric field in superconductors », *Astrophysics*, 47, 201, 2004.

Krikorian, R.A., « Note on a theorem of relativistic hydrodynamics » (soumis a *Nuovo Cimento B*).

Tolls, V., Nisenson, P., Aziz, M.J., Gonsalves, R.A., Korzennik, S.G., Labeyrie, A., Lyon, R.G., Melnick, G.J., Woodruff, R.A., « Study of Coronagraphic Techniques », 2005, *Am. Astronomical Society*.

Martinache, F., J. « PIZZA : a phase-induced zonal Zernike apodization designed for stellar coronagraphy », *Opt. A : Pure Appl. Opt.* 6, 809-814, 2004.

### Présentations invitées dans des colloques :

Labeyrie, A., « Extrasolar planet imaging », *SPIE Glasgow*, 2004.

Labeyrie, A., « Laser-Trapped Mirrors in space : steps towards laboratory testing », *SPIE Denver 2004*, publication en cours avec Fournier, J.M & Stachnik, R., *Proc. SPIE 5490*, in press, 2004.

Labeyrie, A., « The hypertelescope concept and its applications at different scales (1 km, 100 km, 100 000 km) », *Keynote lecture at NASA conf. on Formation Flying*, 2004 (conférence présentée par D. Gezari).

Labeyrie, A., « Hypertelescopes on the Moon and the search for living exoplanets », *COSPAR Paris 2004* (publication en préparation avec J. Schneider dans *Adv. Space Research*).

**Articles publiés dans des actes de colloques :**

Labeyrie *et al.*, « Hypertelescope imaging : from exo-planets to neutron stars Interferometry in space », Proc. SPIE 4852, 236-247, 2003.

Labeyrie, A., « Detecting exo-earths with hypertelescopes in space : the Exo-Earth Discoverer concept », in High Contrast Imaging in Astronomy, EAS Publications series, 8, 327-342, 2003.

Labeyrie, A., « Removal of coronagraphy residues with an adaptive hologram, for imaging exo-earths », in « Astronomy with High Contrast Imaging II : Instrumentation for Coronagraphy and Nulling Interferometry », C. Aime & R. Soumer eds., EDP Sciences, 2004.

Martinache, F., « Phase contrast apodization » EAS Publications series, C. Aime ed., 2004.

Borkowski, V., « A prototype for piston sensing by the dispersed speckle method », in « Astronomy with High Contrast Imaging II : Instrumentation for Coronagraphy and Nulling Interferometry », C. Aime & R. Soumer eds., EDP Sciences, 2004.

Labeyrie, A., « Feasibility of coupling Euro-50 interferometrically to a Carlina hypertelescope », in 2nd Backaskog conf. on ELTs (2003) Proc. SPIE 5382, 2004.

Labeyrie, A. & Le Coroller, H., « Extrasolar planet imaging », Proc. SPIE conf. « Astronomical telescopes and instrumentation », Glasgow, 2004.

Lardière O. *et al.*, « High-contrast imaging with ELTs : Effects of cophasing and AO », in Proc. SPIE 5490, 2004.

Lardière O. *et al.*, « VIDA : A hypertelescope on the VLTI : Last instrument design studies », in Proc. SPIE 5491, 2004.

Lardière, O., « Coronagraphic imaging on the VLTI with VIDA », in High Contrast Imaging in Astronomy, EAS, 2004.

Labeyrie, A., Fournier, J.M. & Stachnik, R.V., « Laser-Trapped Mirrors in space : steps towards laboratory testing », ..., proc. SPIE Boulder, 2004.

Le Coroller et al., « Active and adaptive optics for the Carlina Hypertelescope », 37th Liège Int. Astroph. Coll., 2004.