

PROTOTYPE

L'HYPERTÉLESCOPE un instrument futuriste

Le dispositif optique, avec ses 3 miroirs primaires.



Dans un futur assez lointain, une nouvelle génération de télescopes, les hypertélescopes, verra peut-être le jour. Ce type d'instrument devrait révolutionner notre vision des astres et de l'Univers. C'est du moins ce que pensent Antoine Labeyrie, Denis Mourard et leurs collègues de l'association Hypertélescope Lise (voir note en fin d'article). Cette association soutient le projet d'un prototype actuellement en essai dans une vallée des Alpes du Sud. Les responsables du projet affirment sans complexe qu'un jour les astronomes pourront disposer d'instruments susceptibles d'observer des exoplanètes telluriques! Ce télescope de nouvelle génération serait en effet théoriquement capable d'accéder à ce type d'observation. Et pourquoi pas nous montrer une planète avec des océans, des mers et de la végétation... voire une autre civilisation? Je vous laisse imaginer l'apport que serait pour notre connaissance l'observation directe du système Trappist, par exemple! On peut rêver...

L'HYPERTÉLESCOPE, C'EST QUOI ?

Depuis le début de notre siècle, le VLT (miroir unique de diamètre 8,2 m) et tous les grands télescopes à miroirs segmentés apportent aux astronomes la quintessence observationnelle. Les télescopes Keck et leurs versions agrandies dites ELT comportent tous une mosaïque de miroirs, portés par une grande monture d'orientation et pilotés par une informatique qui reconstitue et stabilise la forme sphérique ou parabolique d'un miroir unique. Ces instruments, portés par une puissante évolution technique de l'optique et de l'informatique associées, ont fait reculer dans ces dernières décennies les limites de l'Univers observable et apporté leur lot de découvertes et, tout naturellement, de nouvelles questions. Le pharaonique projet européen E-ELT aura un miroir primaire de 39 m de diamètre constitué de 798 petits miroirs hexagonaux. En toute logique, on pourrait penser qu'en augmentant ainsi la dimension et le nombre des miroirs de ce type d'instrument, on pourrait disposer de télescopes de diamètres toujours plus grands. C'est malheureusement impossible à réaliser. En effet, si l'on étend ces miroirs mosaïques au-delà d'une quarantaine de mètres, il devient très difficile et coûteux de construire une monture orientable, capable de supporter l'optique et toute la technique associée pour une extrême précision.

Pourtant, si nous voulons observer des exoplanètes en détail ou la surface d'autres étoiles que le Soleil, il faudrait disposer d'un télescope géant d'environ cent kilomètres de diamètre au minimum ! Impossible, direz-vous ? Eh bien, non. D'après l'équipe qui anime le projet, l'hypertélescope serait capable d'atteindre cet objectif ! La solution repose sur un principe qui dérive de l'interférométrie, déjà connue et développée par Antoine Labeyrie : l'idée consiste à utiliser de nombreux miroirs élémentaires, large-



La nacelle suspendue au foyer du méta-miroir primaire. Deux roulettes lui permettent de rouler sur le câble de suspension (noir) qui traverse la vallée à 100 m de hauteur.

ment espacés, formant collectivement un miroir géant. Tout cela est certes connu, mais la nouveauté réside dans l'espace-ment, les supports des miroirs et la façon de combiner directement les images qu'ils forment selon un schéma dit « à pupille densifiée » (voir encadré).

Bien évidemment, la quantité de lumière collectée est beaucoup plus faible qu'avec une même surface entièrement réfléchissante (un miroir unique de même diamètre). Il ne reste pas moins vrai que la résolution fournie serait proportionnelle au diamètre global de la surface sur laquelle sont répartis les miroirs.

Avec des miroirs petits, nombreux et largement espacés, il est parfaitement possible de réaliser un hypertélescope équivalent à un miroir unique de très grande dimension. L'implanter sur Terre semble difficile, ce serait sans doute possible sur la Lune, mais l'espace est évidemment la meilleure localisation.

Afin de mettre en pratique l'idée, puis de l'évaluer, l'équipe du projet a réalisé un prototype. Imaginé puis construit par l'équipe, il a été installé dans un site adapté dans le sud de la France. Les premiers résultats sont là et cette expérience montre qu'il y a de nombreux défis techniques à relever pour le prototype de l'hypertélescope. S'ils sont bien réels, ils ne sont en aucun cas rédhibitoires.

L'HYPERTÉLESCOPE DANS UNE VALLÉE DES ALPES

C'est dans la vallée de l'Ubaye, au sud de Barcelonnette, à la limite des Alpes-Maritimes et des Alpes-de-Haute-Provence, qu'Antoine Labeyrie, en partenariat avec l'observatoire de la Côte d'Azur et sa propre équipe, construit et teste le prototype de l'hypertélescope. C'est un précurseur terrestre de dimension limitée, car contraint par la géographie du site, et cependant suffisant pour tester et évaluer les défis techniques. L'endroit ouvre tout de même une perspective de 1 kilomètre de courbure concave possible. L'expérimentation actuelle repose sur un dispositif de trois miroirs de 150 mm de diamètre, espacés de seize mètres, qui demande cependant une tolérance de positionnement de seulement quelques microns. L'objectif initial est d'atteindre une surface virtuelle de miroirs d'un diamètre d'environ cinquante-sept mètres. L'objectif à plus long terme est d'atteindre les deux cents mètres.

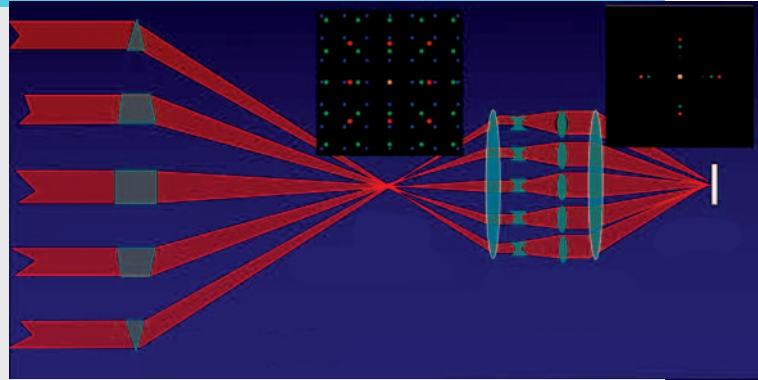
Les faisceaux, collectés par les différents miroirs placés au sol, convergent et interfèrent au point focal où ils forment une image dans un dispositif optique placé dans une nacelle en suspension. Elle surplombe les miroirs, en suspension dans l'espace. Son positionnement doit être assuré au millimètre par un câble porteur de 800 mètres orienté nord-sud, et six autres câbles manœuvrés par des moteurs pas à pas reliés à des treuils in-

Un concentrateur de lumière éparpillée

Comme ses frères, les télescopes à miroirs multiples, l'hypertélescope utilise donc lui aussi des miroirs mais, dans son cas, on parle d'interféromètre et d'optique diluée.

Ainsi qu'on l'a vu précédemment, une optique diluée (c'est-à-dire constituée d'un grand nombre de petits miroirs espacés) ne convient pas pour des sources faiblement lumineuses (exoplanètes, pulsars) en raison de la faible énergie lumineuse captée; le pic d'interférences qui contient l'information à haute résolution de l'image directe ne contient qu'une fraction très faible de cette énergie. Pour intensifier le pic d'interférences, l'idée d'Antoine Labeyrie (1996) consiste à combiner les faisceaux selon un schéma dit « à pupille densifiée ».

De quoi s'agit-il? Classiquement, on appelle « pupille de sortie » d'un télescope l'image miniature du miroir primaire qui se forme à la sortie de l'oculaire, endroit où l'observateur positionne instinctivement la pupille de son œil pour voir l'ensemble du champ, sans vignettage. À titre d'exemple et schématiquement, citons celle que l'on peut facilement voir sur l'oculaire des jumelles quand l'objectif pointe en direction d'une source naturelle de lumière (hors Soleil). Donc, si le miroir primaire est dilué, la pupille de sortie l'est tout autant, avec des sous-pupilles beaucoup plus petites que leur espacement, selon le même rapport que dans l'ouverture d'entrée. Afin d'intensifier le pic d'interférences et donc permettre d'y concentrer toute la lumière éparpillée dans les « speckles », il suffit d'installer à la sortie de l'oculaire, dans le plan de la pupille, des « élargisseurs de faisceau », et ce à raison d'un sur chaque sous-pupille. Ces élargisseurs sont en fait des micro-lunettes de Galilée, mais en position inversée (figure). Elles ont pour fonction, comme leur nom l'indique, d'élargir les dites sous-pupilles. L'œil ou la caméra accède alors à une image dont les halos diffractifs sont rétrécis. En effet, leur lumière étant concentrée et contenue dans le pic d'interférences, l'image est plus lumineuse et la rétine ou le capteur photo y réagissent. Cette concentration reste cependant très sensible à l'alignement de la source observée. Si celle-ci s'écarte un tant soit peu de l'axe optique, le halo diffractif se déplace plus lentement que le pic d'interférence. Ce dernier s'en trouve alors atténué lorsqu'il approche le bord du halo. Cela s'explique par la déformation subie par l'onde de densité à la sortie des micro-lunettes de Galilée. Cette déformation adopte un aspect qui évoque des marches d'escalier. Si leur amplitude est importante et dépasse la tolérance de Rayleigh, le pic d'interférences se dégrade. Les « speckles » multiples envahissent alors le halo et détruisent l'image. Pour ne pas être affectée,



Principe optique de l'imagerie à pupille densifiée, utilisée dans l'hypertélescope. Le miroir géant dilué est ici remplacé par une lentille segmentée (à gauche). Elle co-focalise la lumière d'une étoile sous la forme d'une tache de diffraction analogue à celle que produirait la lentille entière, mais moins intense et entourée de pics secondaires. En reprenant cette image à travers une grille de petites lunettes de Galilée inversées, qui élargissent les faisceaux, l'image est rendue plus lumineuse tout en conservant sa résolution. Le prix à payer est le rétrécissement du champ.

la dimension angulaire de l'objet observé ne doit pas dépasser λ/s , si λ est la longueur d'onde lumineuse et s l'espacement des miroirs primaires.

Ce que nous venons d'expliquer s'applique à une source céleste ponctuelle, comme une étoile. Voyons maintenant l'observation d'un regroupement stellaire, comme des amas d'étoiles à plusieurs sources lumineuses. Dans ce cas, le groupe d'objets doit satisfaire à la condition d'espacement, donc ne pas dépasser la longueur d'onde λ/d , soit la dimension apparente du halo diffractif reporté sur le ciel. Dans ce cas, l'oculaire densificateur doit être remplacé par un « oculaire densificateur multiple ». Ce dernier permettra alors d'obtenir une mise au point fine et précise sur chaque objet du groupe. Cela permettrait par exemple d'observer toutes les richesses contenues au cœur d'un amas globulaire. La résolution atteinte serait telle que nous pourrions observer les éventuelles planètes en orbite autour des étoiles de l'amas. Encore plus loin dans l'Univers, l'étude des noyaux actifs des galaxies en serait grandement améliorée. De toute évidence, l'astronomie en serait révolutionnée.

formatisés. Ainsi asservie avec une précision millimétrique, la nacelle suspendue supporte non seulement le dispositif optique mais compense aussi la rotation terrestre, permettant ainsi de suivre le déplacement apparent des astres. Elle peut être abaissée au sol pour faciliter sa maintenance. Elle contient l'optique qui agrandit l'image primaire, densifie la pupille et forme une image multispectrale sur la caméra « science ». Le train optique de la nacelle contient donc le « densificateur de pupille » et les micro-

lunettes galiléennes qui sont fixées sur un dôme orientable autour de son centre de courbure. C'est justement ce mouvement de rotation qui permet d'accommoder la dérive des pupilles induite par la rotation terrestre. Une caméra auxiliaire détecte les défauts d'alignement, pour l'image et la pupille, lesquels seront corrigés par asservissement informatique, après la phase initiale actuelle de corrections manuelles.

Après traitement par le dispositif optique de la nacelle, l'image capturée est

transmise vers un petit télescope au sol. Précisons et rappelons que l'image produite est une image directe et qu'il ne s'agit en aucun cas d'une imagerie issue d'une recombinaison informatique. À regarder de loin la petite vallée et les câblages intégrés à l'environnement, on pourrait y voir un tableau surréaliste, inspiré par quelque démiurge à l'esprit arachnéen et poétique! Indiquons aussi que le système est déménageable vers des vallées plus larges, comme dans les Andes chiliennes ou l'Himalaya, où un

tel système pourrait atteindre une méta-ouverture de 1200 m !

Les premiers essais du prototype mettent en évidence les problèmes techniques à résoudre. Outre l'architecture de base, plusieurs instruments auxiliaires servant à mesurer les erreurs de mise en place et d'alignement sont à améliorer. Nous pouvons citer le viseur à équerre optique de réglage des miroirs primaires en hauteur, le viseur suiveur de la nacelle à « œil-de-chat holographique » pour orienter finement les miroirs, et le télémètre laser suiveur pour mesurer puis contrôler la hauteur de la nacelle avec la précision millimétrique souhaitée. Après quatre campagnes estivales d'essais sur la célèbre étoile Véga de la Lyre, la précision du pilotage de la nacelle a pu atteindre la tolérance initialement spécifiée de 1 mm. Entre-temps, celle-ci a pu être relâchée à 10 mm, et ce grâce à une modification de l'optique focale qui permet d'observer en parallèle un champ multiple. Le pilotage de base et son logiciel ont ainsi pu être validés. La durée des observations est limitée à 50 minutes environ. C'est le temps maximum autorisé par la



Le miroir collecteur de lumière

course des câblages de pilotage et d'équilibre des forces sur la nacelle. Différentes améliorations du logiciel sont à ce jour entreprises par ses concepteurs sur un banc d'essai en laboratoire installé à l'observatoire de Calern. Le prototype montre donc les points perfectibles, et ce en toute logique inhérente à un prototype. Les pistes sont

posées, il ne reste qu'à les suivre. Une fois résolues les réelles difficultés techniques, il faudra passer du prototype à l'instrument réel. L'hypertélescope pourrait atteindre son objectif, celui de nous révéler avec plus de finesse les astres de l'Univers et, dans son sillage, son incontournable lot de nouvelles questions.



photos M. Roussel et J-P. Rochaix + Google Earth



Antoine Labeyrie

Né à Paris en 1943, Antoine Labeyrie est une grande personnalité scientifique et un astrophysicien de haut niveau. Il est membre de l'Académie des sciences. Antoine Labeyrie est à l'origine de l'idée du couplage interférométrique de petits télescopes, technique largement utilisée aujourd'hui. On lui doit aussi l'idée d'introduire dans la technique de l'optique adaptative un laser pour créer une image artificielle. Dans le cadre de la chaire d'astrophysique observationnelle du Collège de France dont il est titulaire depuis 1990, A. Labeyrie a créé en 2000 le Laboratoire pour l'interférométrie stellaire et exoplanétaire (LISE) et, depuis 2006, il œuvre en vue du développement d'un hypertélescope prototype dans le site du vallon de la Moutière, dans l'Ubaye.

L'Astronomie: Qu'est-ce qui vous fait penser que l'hypertélescope est l'instrumentation astronomique du futur ?

Antoine LABEYRIE : Les télescopes en construction de l'actuelle génération « ELT », avec leur grand miroir mosaïque approchant 40 m porté par une encombrante monture sous une grande coupole, approchent de leurs limites techniques, pour un coût dépassant le milliard d'euros. Des hypertélescopes terrestres pourraient atteindre 1 200 m, gagnant ainsi un facteur 30 en résolution. Dans l'espace, une flottille de nombreux petits miroirs piégés par « pincette optique » avec une paire de rayons laser pourrait atteindre une dimension de l'ordre de 10 000 km. Par leurs performances d'observation, ces versions terrestres puis spatiales d'hypertélescope, attendues à court puis moyen terme, représentent probablement l'avenir de l'astronomie optique. Les qualités de légèreté, modularité et croissance des architectures contrastent avec la lourdeur des instruments classiques, malgré leur allègement de ces dernières décennies.

Quand le prototype actuellement à l'essai sera complet, que pourra-t-on observer ?

Qui n'a pas rêvé devant les photos du télescope *Hubble*? Les avancées issues des observations de cet instrument ont révolutionné l'astronomie. La résolution des clichés du HST atteint 40 millisecondes d'arc. Alors imaginez ce qu'apporterait à l'astronomie un instrument de 57 mètres de diamètre, approchant une résolution de 2 millisecondes d'arc ? Soit vingt fois mieux que le HST. C'est cette résolution qu'atteindra initialement l'hypertélescope, mais l'ajout de miroirs portant le diamètre de méta-ouverture à 200 m devrait pousser la résolution à 0,5 milliseconde... en attendant 1 200 m... ! Nous devrions donc voir les exoplanètes les plus proches du Système solaire. Mais il faudra attendre les versions spatiales pour voir les continents

de ces planètes et d'éventuelles taches colorées, fluctuant selon les saisons, qui pourraient trahir des formes de vie photosynthétique. Sans compter les surprises...

Quel est le défi technique majeur du prototype testé actuellement dans la vallée des Alpes ?

C'est de piloter avec précision, à quelques millimètres, la nacelle suspendue à 100 mètres de hauteur. L'asservissement des six petits moteurs pas à pas qui l'entraînent et l'orientent est un vrai défi. Les derniers essais de l'année 2015 sont probants. Ils vont dans le bon sens et les résultats sont très prometteurs.

Comment la gestion et la coordination de l'équipe s'effectuent-elles en pratique ?

L'équipe actuelle regroupe 18 personnes: astrophysiciens, astronomes amateurs, électroniciens, développeurs en informatique, mécaniciens, administrateurs site web et réseaux sociaux, conseillers financiers, etc. De son côté, Antoine Labeyrie, en tant que professeur émérite du Collège de France, poursuit ses recherches sur l'hypertélescope dans le cadre d'une convention qui lie le Collège de France et l'observatoire de la Côte d'Azur (OCA). Le projet repose pour partie sur le travail des bénévoles et sur les contributions des adhérents à l'association, et ce en complément du travail de différents organismes: l'OCA, l'IOGS (Institut d'optique Graduate School) et le laboratoire LOMA de l'université de Bordeaux notamment. La coordination des équipes et la gestion du projet est sous la tutelle d'une association loi 1901 créée dans ce but.

Un projet d'une telle ampleur peut-il être véritablement porté et réalisé par des bénévoles ?

De toute évidence, oui ! Grâce à l'architecture modulaire du système. Même si les finances actuelles ne permettent pas de salarier des collaborateurs, nous avons réussi le pari de mener à bien la campagne 2015. Le site des essais a été réinstallé et les tests se sont déroulés comme prévu dans le protocole. Même si le bénévolat engendre quelques contraintes, toutes les conditions sont réunies pour que l'aventure continue.



Des bénévoles à l'œuvre.



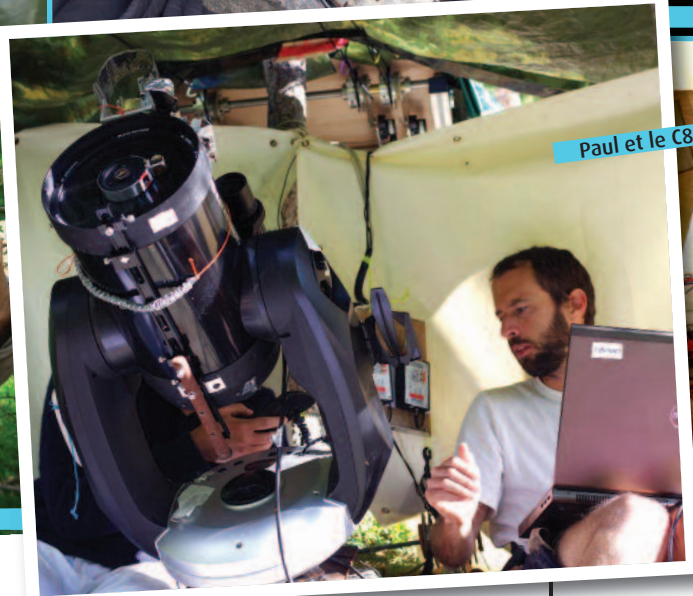
A. Labeyrie



Le poste de contrôle.



A. Labeyrie



Paul et le C8.



L'atelier de soudure sous la tente.

AUX SCIENCES CITOYENS!

Antoine Labeyrie est devenu célèbre à la fin du xx^e siècle pour sa contribution au développement de l'interférométrie optique. C'était dans les années 1970-1980, loin de l'académisme dominant et imposant des grands laboratoires, et avec de petits moyens. Il a par exemple jeté les bases techniques de ce qui fait aujourd'hui fonctionner le couplage interférométrique du VLT. Rien de moins! Dans la continuité visionnaire qui le caractérise, il est intimement persuadé, et nombreux sont ceux et celles qui partagent cette pensée, que l'hypertélescope est l'instrument de l'avenir.

Aujourd'hui, officiellement à la retraite, Antoine Labeyrie refuse d'abdiquer et de succomber aux charmes des sirènes de la stérilisation créative. Malheureusement, son statut de retraité a entraîné du même coup, et de manière mécaniquement administrative, la suppression des financements de ses travaux. Pour y remédier, de manière provisoire et dans l'attente d'une saine réaction politico-administrative et donc financière, une association, HYPERTÉSCOPE LISE*, gère et assure la survie du projet. Les coordinateurs de l'association ne cessent de faire connaître le projet et de susciter des vocations de citoyenneté scientifique. La re-

cherche de financements de projets privés, non couverts par les tutelles de l'État, relève d'un « acte de foi », ironisent-ils! Nous ne pouvons que souscrire à la démarche de l'association, toute empreinte de science citoyenne, car elle s'appuie sur le savoir et la rigueur de la démarche d'Antoine Labeyrie, personnage atypique du monde scientifique, mais scientifique avant tout. Les adhérents de l'association HYPERTÉSCOPE LISE sont aussi des volontaires de terrain. Ils participent en effet à la réalisation et au bon fonctionnement des expériences. Et chacun apporte au projet ce qu'il peut dans son domaine de compétences. De l'informatique à l'administratif ou la technique, en passant par la mécanique, tous répondent présents,

dans la mesure du temps et des moyens dont ils disposent. Et tous portent en eux cette valeur qui a fait ses preuves, la citoyenneté. Et dans le cas présent, elle est rien de moins que scientifique. L'hypertélescope mérite toute notre attention. S'il se révèle en capacité d'accéder aux prétentions de son concepteur, l'astronomie en serait révolutionnée. Imaginez un millier de miroirs, de quelques centimètres de diamètre, espacés d'une dizaine de kilomètres, répartis sur une surface d'une centaine de kilomètres carrés en orbite autour de la Terre? Combien de mondes nous montrerait-il! C'est là le secret espoir d'Antoine Labeyrie et de ses collègues, mais pas seulement, car nous sommes nombreux à le vouloir. ■

*Adhérer à l'association LISE et soutenir notre projet

<http://hypertelescope.org/participer/adherer/>

HYPERTÉSCOPE LISE – Laboratoire d'interférométrie stellaire et exoplanétaire

– Association loi de 1901 – Un site: <http://hypertelescope.org/>

Suivez le projet de l'Hypertélescope sur Facebook

<https://www.facebook.com/Hypertelescope?fref=nf>

PDF: <https://lise.oca.eu/IMG/file/WhitepaperProposalHypertelescope.pdf>

Vidéo-conférence d'A. Labeyrie (Collège de France 2016, durée 1 heure): www.college-de-france.fr/site/antoine-labeyrie/Conference-video.htm