



Opinions Libres

le blog d'Olivier Ezratty

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : grands télescopes

Après une première partie dédiée aux **dimensions de l'Univers**, et une seconde qui couvrait l'**histoire des télescopes et notamment de leurs capteurs CCD**, passons à un tour d'horizon des nouvelles technologies mises en œuvre dans les télescopes contemporains. Cela nous permettra de partir à la découverte des plus grands observatoires d'astronomie optique du monde.

Nous nous intéresserons en particulier à appréhender la diversité des instruments qui équipent les télescopes modernes. Cela dépasse l'entendement. Un grand télescope peut être équipé d'une vingtaine d'instruments divers pour analyser les images dans tous les sens. Chaque instrument a son utilité. La spectrographie permet de comprendre de quelles matières sont faites les étoiles et galaxies. La coronographie et l'interférométrie permet de découvrir des exoplanètes. On les visualise directement alors qu'avec la méthode des transits, on ne fait que deviner leur présence grâce à l'analyse de la variation de la luminosité des étoiles dans le temps, via de la photométrie. L'analyse dans l'infrarouge permet de détecter des objets célestes lointains et qui s'éloignent du fait de l'expansion de l'Univers.

Je ne vais pas m'attarder sur les programmes scientifiques de ces télescopes ou de leurs découvertes qui sont souvent pléthoriques. Je m'intéresse ici un peu plus aux outils qu'aux découvertes qu'ils permettent de faire, même si ces dernières sont passionnantes et assez bien couvertes par la littérature scientifique pro et grand public. Nous la couvrirons en partie dans l'un des articles de cette série que je consacrerai spécifiquement à la recherche des exoplanètes.

Bien entendu, je n'invente rien dans ces articles. Je vais à la pêche aux informations techniques sur Internet, qui n'en est pas avare, et j'en fais une compilation à ma façon, avec un regard de néophyte curieux. Pour cette série d'articles, j'ai téléchargé et dépiauté plus de 500 documents et présentations ! Ces télescopes représentent un domaine technologique relativement méconnu, y compris chez les experts du numérique comme de ceux de la photo. Je ne connaissais que 10% de ce que vous trouverez dans ces lignes avant de me lancer dans cette série !

Vous découvrirez ainsi d'étonnants télescopes à miroir liquide, au mercure ! Je vous épargnerai cependant les aspects scientifiques les plus pointus, en particulier dans le domaine de l'optique et de l'interférométrie. Ils m'échappent autant qu'ils sont difficiles à vulgariser.

Vous vous demandez peut-être où est l'entrepreneuriat dans cette série d'articles ? Je cite bien quelques entreprises françaises existantes dans ces parties sur les télescopes. Mais la partie réservée aux entrepreneurs aventuriers de l'espace arrivera à la fin ! C'était un prétexte pour pouvoir vous faire découvrir un peu de sciences et de technologies et aussi, pour relativiser les ambitions des dieux vivants que sont Elon Musk et autres Jeff Bezos.

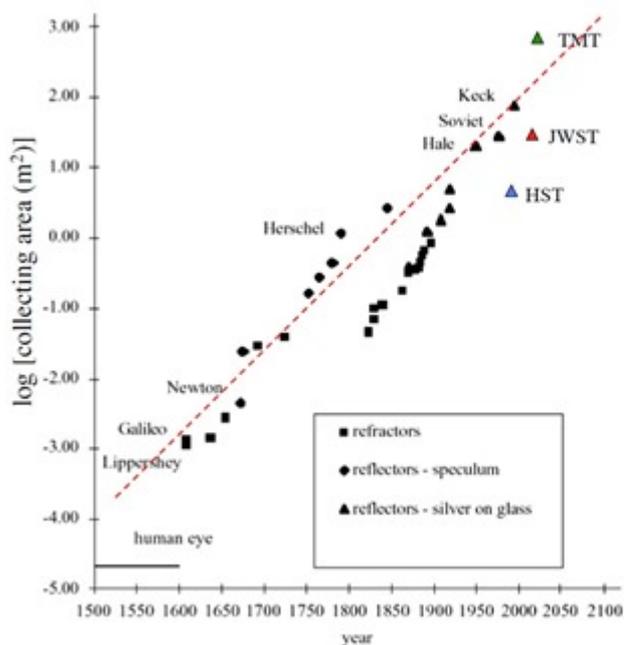
Les innovations des grands télescopes

Les technologies de ces télescopes ont progressé de nombreuses manières pour leur permettre d'observer

l'Univers en remontant encore plus dans le temps et les distances, en détectant des exoplanètes et en analysant la composition des planètes, des étoiles et des galaxies pendant tout leur cycle de vie.

La **course à la taille des miroirs** principaux des télescopes s'est poursuivie jusqu'à la fin du 20e siècle pour se stabiliser aux alentours de 8 à 10 mètres. C'est l'un des paramètres permettant aux télescopes de capter un maximum de lumière lors des observations et d'améliorer également la résolution des images reçues. Celle-ci est en effet proportionnelle à la longueur d'ondes reçue et inversement proportionnelle à la taille du télescope ou à une celle d'une combinaison de télescopes. Nous avons vu dans la partie précédente que cette dernière dépendait aussi de l'évolution des capteurs CCD utilisés pour capter la lumière, du proche ultra-violet au proche infrarouge en passant par le visible. Mais les progrès des CCD sont tels qu'ils sont maintenant à la limite théorique de résolution des télescopes (il me semble...). Mais ce n'est pas tout !

croissance de la surface de collecte de lumière de télescopes



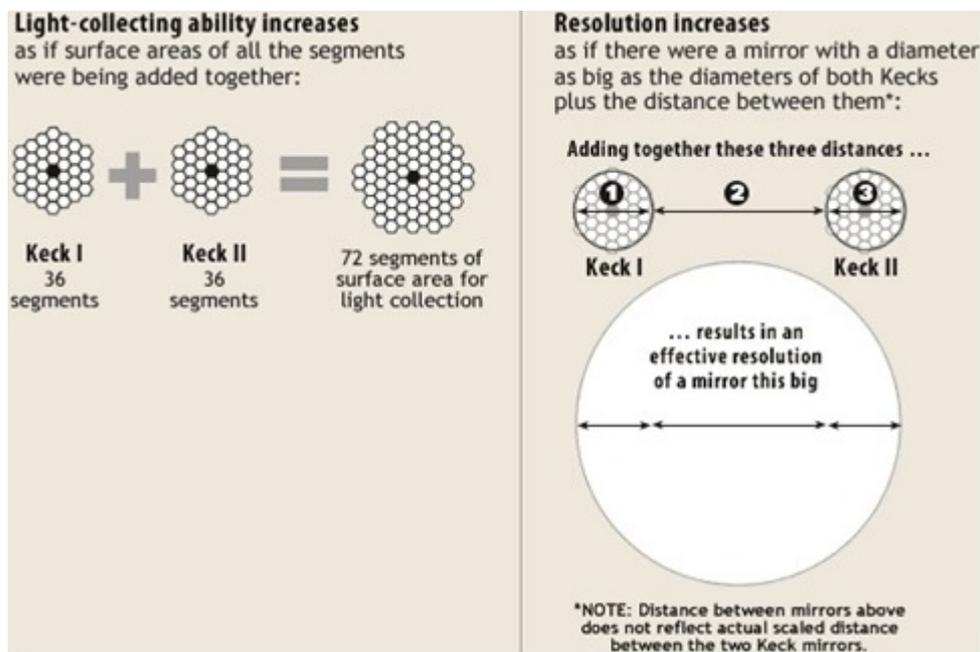
en période longue, cette croissance est exponentielle

la construction de miroirs géants est complexe

d'où l'utilisation de miroirs multiples et d'optiques adaptatives

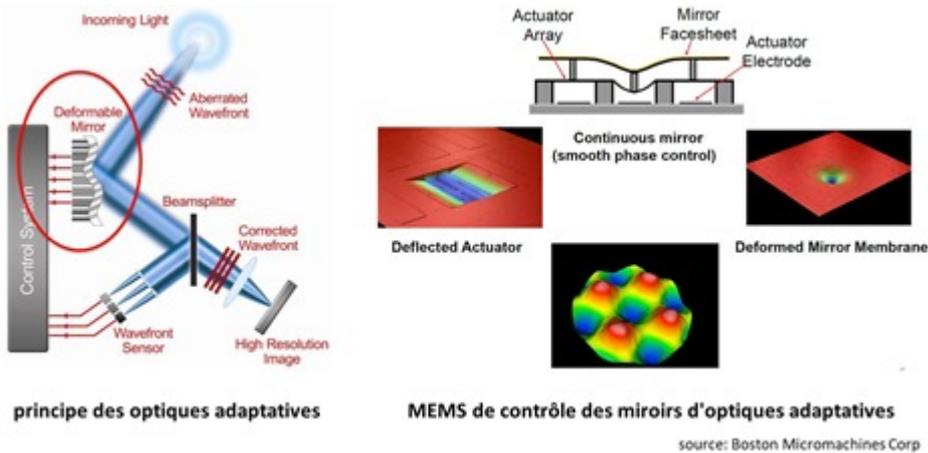
Les grands télescopes sont depuis plus d'une décennie construits à partir de **miroirs segmentés**, hexagonaux, qui peuvent être pilotés individuellement pour gérer l'optique adaptative. Ces miroirs sont très fins et légers et donc plus faciles et rapides à construire et aussi à contrôler. Ils réduisent aussi le poids de l'infrastructure supportant le télescope. C'est le moyen qui permet maintenant de continuer à faire croître régulièrement la surface de collecte de la lumière des télescopes qui suit une évolution exponentielle depuis cinq siècles (*ci-dessus*). Pourquoi en est-on arrivé là ? A la fois parce qu'il était de plus en plus difficile de fabriquer des miroirs parfaits dépassant 10 m de diamètre et aussi, plus pratiquement, parce qu'il était très difficile de les transporter, par la route ou par les airs jusqu'aux télescopes qui sont souvent installés en altitude ! Airbus a les mêmes contraintes à gérer pour déplacer en Europe les grandes pièces détachées de ses Airbus 380 !

Cette croissance en surface devrait cependant se calmer sur terre car plus grands sont les télescopes, plus les projets sont longs à monter. Même si plusieurs télescopes avec des miroirs de 30 à 39 mètres sont en gestation. Par ailleurs, ces télescopes sont aussi concurrencés par les télescopes spatiaux qui, s'ils ont des miroirs de taille plus modeste, bénéficient de l'absence de diffraction générée par l'atmosphère pour les télescopes terrestres [source schéma] et surtout, qui peuvent capter les fréquences du spectre électromagnétique qui ne traversent pas l'atmosphère. Lorsque nous analyserons dans une autre partie les performances des télescopes spatiaux, nous verrons comment les télescopes terrestres et spatiaux se concurrencent et se complètent selon les cas.



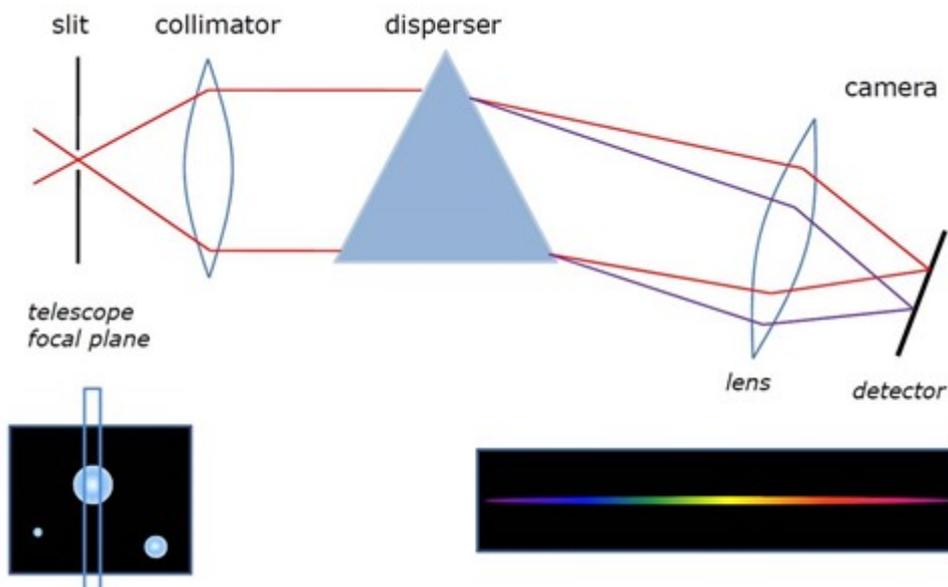
Les télescopes modernes sont maintenant couramment équipés d'**optiques actives et adaptatives** qui déforment dynamiquement les miroirs pour corriger leurs défauts et tenir compte de la déformation de la lumière par l'atmosphère terrestre (diffusion, diffraction). Cela requiert des mécaniques sophistiquées et très précises tout comme des logiciels puissants. La technique est utilisée dans les miroirs secondaires pour les télescopes anciens et/ou sur les miroirs principaux pour les télescopes les plus récents, surtout s'ils sont construits en segments de miroirs hexagonaux.

Les systèmes d'optiques adaptatives exploitent quasiment systématiquement un **système de guidage et de calibrage** de l'optique adaptative à base de lasers (LGS = Laser Guidance Systems). Des lasers créent une ou plusieurs étoiles fictives dans le ciel en éclairant les fines particules de sodium que contient la mésosphère, la partie haute de l'atmosphère comprise entre 90 et 110 km d'altitude. Ces lasers émettent un rayon utilisant la fréquence d'excitation du sodium, qui correspond à la longueur d'onde de 589 nm. Il génère une fluorescence similaire à celle d'une étoile qui peut ensuite être détectée par un capteur CCD dédié du télescope. Celui-ci va analyser les déformations de la lumière générées par l'atmosphère. La mesure est encore plus précise lorsque plusieurs lasers sont utilisés simultanément. Les lasers utilisés dépassent 20 W de puissance émise. Ces systèmes laser sont conçus pour éviter d'illuminer par inadvertance les avions [source : **Les étoiles laser artificielles**]. L'information reçue par le LGS (Laser Guidance System) permet ensuite d'agir sur des systèmes de vérins mécaniques, magnétiques et/ou à base de MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) qui contrôlent la surface des miroirs principaux ou secondaires pour réduire les effets de distorsion induits par l'atmosphère terrestre [source]. Ces MEMS proviennent de sociétés spécialisées comme Boston Micromachines Corp (*ci-dessous*) ou du français CILAS qui est basé à Orléans.

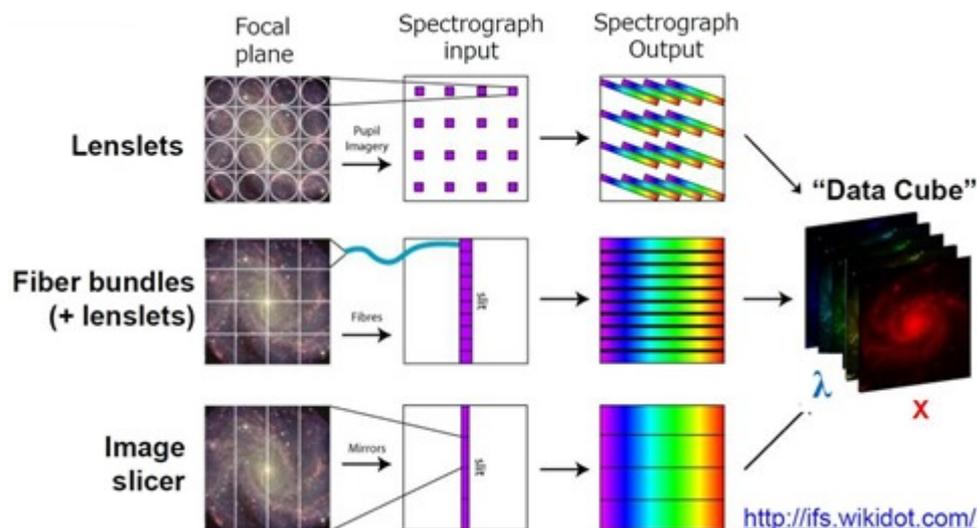


L'**interférométrie optique** est de plus en plus utilisée pour combiner l'image de plusieurs télescopes. Elle améliore la résolution des images générées au point de la faire égale à celle d'un télescope classique dont le diamètre engloberait tous les télescopes du dispositif. Par contre, comme la quantité de lumière n'augmente pas énormément, la sensibilité n'est pas radicalement meilleure. L'interférométrie optique est plutôt réservée aux objets célestes les plus lumineux. Elle permet notamment de déterminer la taille des étoiles observées. L'interférométrie est utilisable en particulier dans les hyper télescopes qui recombinaient de manière optique et sans calculs les images issues de plusieurs télescopes et miroirs. Cette méthode a été inventée par le français Antoine Labeyrie, à l'origine du premier interféromètre à deux télescopes en 1975.

Dans le même temps, les télescopes terrestres optiques se sont améliorés en explorant le **proche infrarouge** en plus du visible, aidés en cela par les capteurs CCD spécifiques fonctionnant dans ces longueurs d'ondes. Les télescopes ont été aussi progressivement équipés de capteurs divers pour détecter la matière contenue dans les objets célestes observés et notamment de spectrographes dont nous examinerons plus loin quelques spécimens. Les spectrographes décomposent la lumière via un prisme pour identifier les longueurs d'onde qui la composent. Le spectre contient des marqueurs servant à identifier la composition des objets observés. La qualité d'un spectrographe se mesure notamment par sa résolution spectrale, à savoir le nombre de raies spectrales qu'il est capable de générer. Cette résolution peut aller de 1000 à plus de 100 000 raies spectrales. On peut ainsi identifier la proportion d'hydrogène, d'hélium et d'autres éléments des étoiles, ainsi que de la composition de l'atmosphère des exoplanètes (CO₂, eau, azote, ...) qui sont des marqueurs d'une vie potentielle. Les spectrographes infrarouges sont systématiquement confinés dans des installations cryogéniques, refroidies à des températures inférieures à -40°C pour le proche infrarouge ou descendant jusqu'à -265°C pour l'infrarouge moyen. Le refroidissement permet aux capteurs CCD de ne pas être perturbés par les rayons infrarouges provenant de l'environnement et du télescope lors des observations [source du schéma ci-dessous].



La spectrographie s'appuie de plus sur la technique de l'**Integral Field Spectroscopy** (IFS) et des Integral Field Units qui décomposent spatialement l'image à analyser en points, zones rectangulaires ou bandes pour les faire ensuite traverser un prisme qui va en décomposer la lumière, le tout alimentant un ou plusieurs capteurs CCD [source du schéma ci-dessous]. Le "slicer" à bandes est le plus répandu dans les télescopes terrestres. Ce genre de spectrographe permet d'analyser simultanément plusieurs objets d'un champ de vue télescopique, comme diverses étoiles ou galaxies. Il génère un cube de données avec dans les tranches, une vue dans une fréquence donnée et dans l'orthogonale, la spectrographie de parties d'images. Un télescope moderne pourra facilement être équipé d'une demi-douzaine de spectrographes. La variantes concernent les longueurs d'onde explorées (proche UV, visible, proche infrarouge, infrarouge moyen), la manière de découper l'image en sous-images, la résolution spatiale et la résolution spectrale. Les usages scientifiques varient en fonction de tous ces paramètres.



Les télescopes sont parfois équipés de **coronographes** (coronagraph en américain) qui sont des caches occultant une étoile ou un autre objet observé pour détecter son entourage, comme ses exoplanètes. Cela passe par un traitement de l'image permettant d'éliminer les franges de diffraction générées par ces caches. Le coronographe a été inventé et expérimenté sur l'observatoire du Pic du Midi par le français Bernard Lyot en 1930, pour observer la couronne solaire. Il a donné son nom au télescope du Pic du Midi qui est équipé d'un modeste miroir de 2 m. La coronographie couplée à l'interférométrie permet maintenant la détection visuelle directe d'exoplanètes alors qu'auparavant (à ses débuts dans les années 1990), elle était indirecte, principalement via la méthode des transits analysant les variations temporelles et spectrales de la lumière émise

par les étoiles.

Les télescopes ont une **durée de vie** qui se compte en décennies. Pendant ce laps de temps, ils sont régulièrement upgradés au niveau de leurs instruments. Les mises à jour concernent notamment les systèmes de visée laser liés aux optiques adaptatives ainsi que le perfectionnement des spectrographes et des capteur CCD qui gagnent régulièrement en résolution et sensibilité.

Enfin, les grands télescopes sont quasiment tous des **projets internationaux**. Ils sont installés le plus souvent à Hawaï (Mauna Kea) ou au Chili, en altitude, là où l'atmosphère est très sèche, limitant les effets de diffraction de la lumière. On en trouve aussi aux Canaries. Aux USA, les Universités américaines dominent le terrain, elles-mêmes financées par l'Etat Fédéral (NSF et NASA). En Europe, une bonne part des projets sont menés sous l'égide de l'ESO, l'European Southern Observatory, installé au Chili et lancé en 1962, là où plusieurs générations de télescopes sont déployées ou en construction. L'ESO est supporté par de nombreux pays européens dont la France, qui en est un grand contributeur scientifique et industriel, ainsi que par le Brésil et la Suisse. Cette collaboration internationale est voisine de celle qui intervient dans de nombreux projets spatiaux en général, côté fusées, satellites ou autour de l'ISS (International Space Station).

Les grands télescopes contemporains

Il existe en tout une quarantaine de télescopes terrestres dotés d'un miroir principal faisant plus de 3 mètres de diamètre. Sachant que le nombre d'observatoires est encore plus réduit, certains télescopes étant concentrés sur quelques sites comme celui de Mauna Kea à Hawaï, aux Canaries et au Chili.

Commençons ce tour par les grands télescopes dotés d'un miroir principal monolithique, de grande taille, sachant qu'il ne s'en fabrique depuis plus de 15 ans. Ces télescopes sont cependant régulièrement mis à jour avec de nouveaux instruments tenant compte des progrès dans les optiques adaptatives (pour les miroirs secondaires), les capteurs CCD et les spectrographes en tout genre.

Les grands télescopes ont quelques caractéristiques communes du côté gestion de projets. Leur conception et leur construction peut prendre beaucoup de temps, facilement plus de dix ans et peut même dépasser la vingtaine d'année. Leur mise à jour vise à améliorer leur résolution, les mécanismes de pointage laser et d'optique adaptative. Parfois, ils ne fonctionnent pas bien au moment de leur lancement et traversent de longues années de mise au point. Enfin, lorsqu'ils sont devenus périmés, ils peuvent être démantelés ou être transformés en musées.

Du côté de leurs domaines d'applications, une bonne partie des grands télescopes est à usage généraliste du fait d'une panoplie d'instrumentation très variée permettant d'étudier les étoiles et leurs exoplanètes dans la Voie Lactée, les galaxies éloignées ainsi que, de manière directe ou indirecte, les trous noirs, les pulsars et les quasars.

United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT)

C'est un télescope doté d'un miroir principal de 3,8 mètres. Il a été inauguré en 1979 et était dédié aux observations dans le spectre infrarouge. Il a été équipé d'une nouvelle caméra à large champs en 2004. Il est depuis 2012 opéré par l'Université d'Arizona, celle de Hawaï et Lockheed Martin avec un financement du NASA Orbital Debris Program Office. Installé sur le site Mauna Kea de Hawaï, ce télescope attend depuis 2015 son démantèlement. Il aura été opérationnel plus de 35 ans.

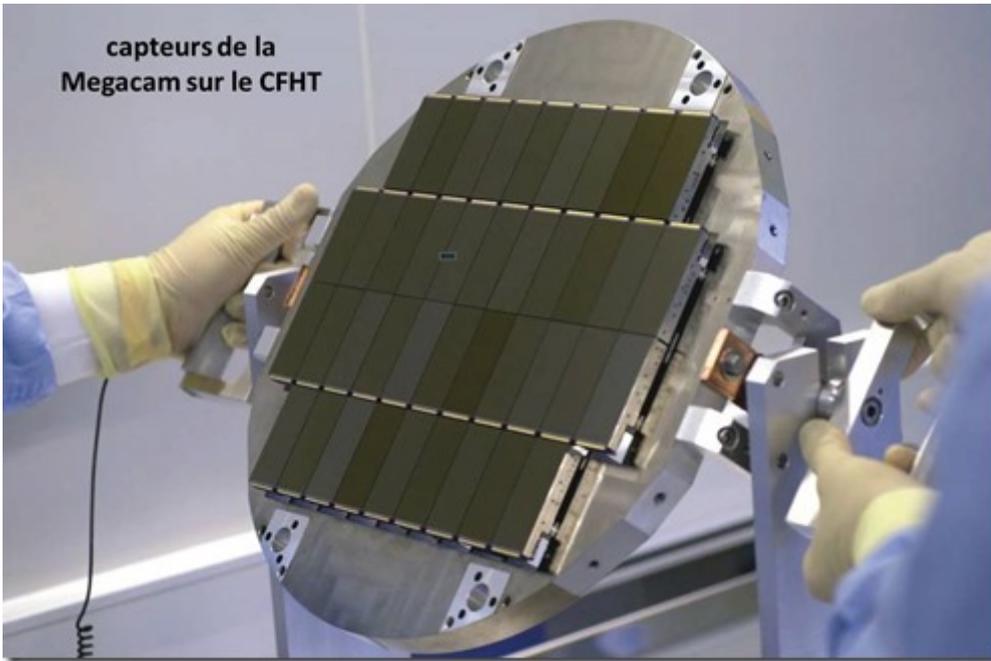


Canada-France-Hawaï Telescope (CFHT)

C'est un télescope conjoint entre le National Research Council du Canada, le CNRS et l'Université de Hawaï. C'est l'un des premiers qui ait été installé, en 1979, sur le site de Mauna Kea à 4200 m d'altitude. Il est équipé d'un miroir principal de 3,6 m, d'une caméra à haute résolution à large champs dans le visible et d'une caméra dans le proche infrarouge, la WIRCAM, dotée de 4 capteurs totalisant 16 mpixels mise en place en 2006. Il est équipé depuis 2003 d'une MegaCam qui couvre un champ d'un degré carré et comprend 36 capteurs CCD de 2048 x 4612 pixel (340 mpixels) couvrant le visible et le proche infrarouge. Conçue et fabriquée par le **CEA de Saclay**, elle permet depuis 2002 l'étude de d'astéroïdes et de galaxies éloignées tout comme de la Voie Lactée et Andromède.



L'instrumentation comprend également SITELLE, un spectrographe Fourier à large champ dans le visible lancé en 2015 et construit par ABB Analytical au Canada, équipé de deux caméras de 2048 x 2048 pixels originaires d'E2V. il peut produire simultanément un millions de spectrographies. On y trouve aussi SPIROU, un spectromètre à polarisation dans le proche infrarouge.



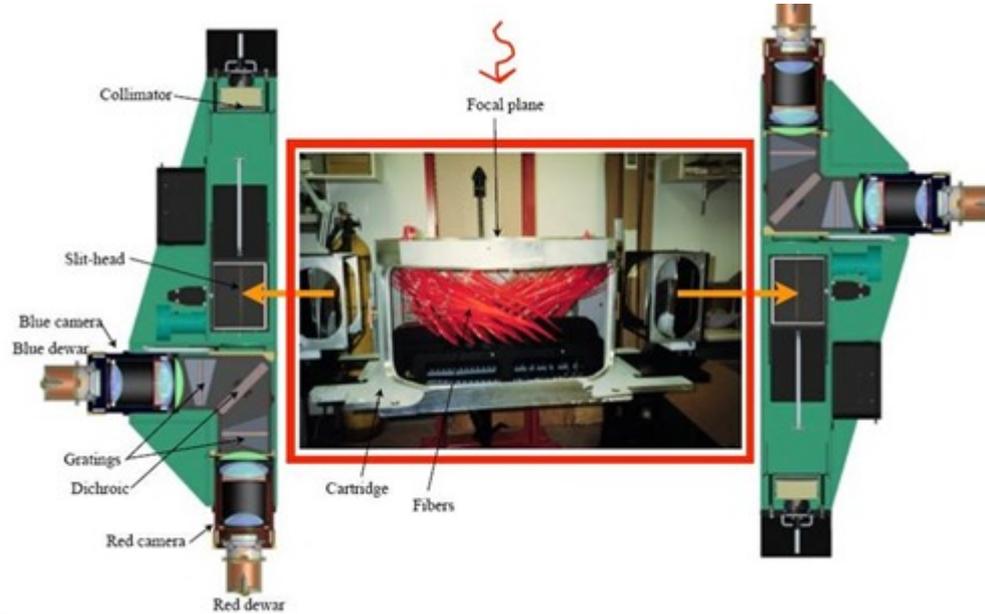
Le télescope a récemment permis la découverte de diverses exoplanètes, dont une exoplanète massive grâce au principe des lentilles gravitationnelles (**source**), de la matière noire reliant deux galaxies (**sources**), de la formation d'une galaxie géante (**source**) et d'une mesure plus précise de la constance de Hubble qui évalue l'éloignement des galaxies dans l'Univers (**source**). Après 38 ans d'opérations, ce télescope semble être toujours en activité.

Sloan Foundation Telescope

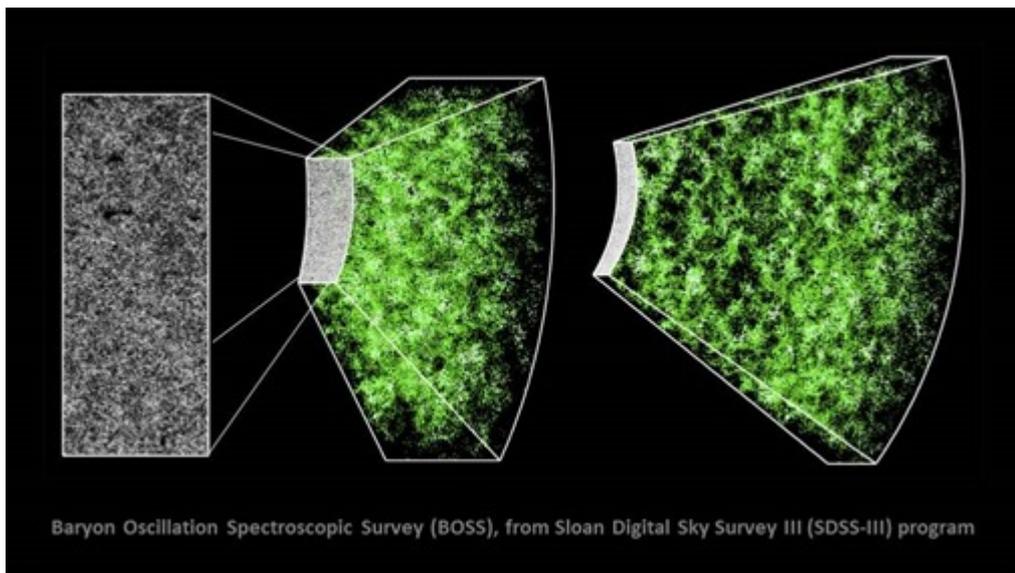
C'est un télescope australien qui est modeste en taille avec son miroir de 2,5 m. Il est opérationnel depuis 1998 et est dédié depuis des années au programme SDSS de cartographie en volume d'une partie de l'univers. Le télescope utilise un spectrographe à fibres optiques qui s'appuie d'abord sur de la photométrie pour déterminer les objets à analyser en fonction de leur nature. Ce projet est voisin de celui de l'Espagnol JPAS que nous avons évoqué dans l'article précédent.



Le capteur est différent : au lieu d'un capteur CCD doté de 56 filtres dans l'infrarouge, il réalise de la spectroscopie multiple à base d'un millier de fibres optiques captant la lumière arrivant dans le plan de focale. La spectrographie se concentre sur les galaxies éloignées de 6,4 à 7 milliards d'années-lumière.



1,2 millions de galaxies ont été analysées à ce jour et intégrées dans un modèle 3D de la tranche d'Univers analysée. La répartition des galaxies détectées est cohérente avec l'explosion résultante du big bang détectée avec les sondes spatiales telles que Planck qui ont analysé le bruit cosmique résiduel du big bang.



Very Large Telescope

C'est un observatoire de l'ESO situé sur le site de Cerro Paranal au Chili, à 2635 m d'altitude. Proposé initialement en 1972 par le français Antoine Labeyrie, il a été mis en service à partir de 2001. La fin du projet de construction a été supervisée par la chercheuse française Catherine Cezarsky qui dirigea l'ESO entre 1999 et 2007. Il utilise le principe de l'interférométrie comprenant quatre télescopes dotés chacun d'un miroir de 8,2 m de diamètre pesant 23,5 tonnes et réalisés en Zerodur de 17,2 cm d'épaisseur, une sorte de céramique bénéficiant d'absence de dilatation thermique. Ces grands miroirs ont été réalisés par le français Safran Reosc (anciennement chez Sagem). Les miroirs secondaires ont un diamètre de 1 m et pèsent 42 kg.



Les télescopes sont dotés d'optiques actives et adaptatives. Pour cela, la forme du miroir principal des quatre télescopes de 8,2 m est contrôlée verticalement par 150 vérins avec une précision de quelques centaines de nano-mètres nécessitant des calculs complexes par éléments finis. Ces quatre télescopes de 8,2 mètres sont notamment exploités par le VLTI, un laboratoire d'interférométrie qui collecte les rayons lumineux de ces télescopes pour alimenter divers instruments d'interférométrie dans le visible et l'infrarouge (AMBER et MIDI, ce dernier ayant été retiré du service en 2015). L'alimentation de l'interféromètre passe par des lignes à retard optiques permettant l'alignement temporel des images issues des miroirs des différents télescopes du VLT.

La palette des instruments équipant actuellement le VLT est des plus large avec :

- CRIRES, un spectrographe dans le proche infrarouge à haute résolution spectrale (100 000 raies). Il est en cours d'upgrade vers le CRIRES+ qui étend la largeur spectrale étudiée.
- FLAMES, un spectrographe dans le visible, haute résolution (47 000 raies) et multi-objets via des fibres optiques positionnables alimentant le GIRAFFE, un spectrographe dans le visible et le UVES dans l'ultraviolet et le visible. Ce dernier couvre 8 objets à la fois.
- FORS, un spectrographe dans l'ultra-violet équipé de deux CCD de 2Kx4K pixels.
- HAWK-I, un imageur dans le visible à large champ doté de quatre CCD de 2Kx2K pixels et 10 filtres de couleurs.
- KMOS, un spectrographe dans le proche infrarouge multi-objets capable de suivre 24 cibles différentes grâce à un système qui positionne individuellement 24 miroirs de captation de portions du champs visuel à analyser dans le plan de focale du télescope. Le tout alimente trois CCD E2V de 2Kx2K pixels qui sont refroidis à 35K (-238°C). La résolution spectrale est de 1500 raies.

- SINFONI est un spectrographe dans le proche infrarouge avec quatre prismes balayant les bandes J, H, K et H+K de l'IR, et un capteur CCD de 2Kx2K pixels.
- SPHERE est un système d'optique adaptative couplé à un coronographe et à un spectrographe.
- VIMOS est un imageur à large champ dans le visible complété d'un spectrographe multi-objets dotés de capteurs CCD E2V de 4K x 2K pixels.
- VISIR est un spectrographe dans l'infrarouge moyen, construit par le CEA.

L'ensemble est complété par quatre télescopes de 1,8 m et d'un télescope à champ large de 2,5 m, le VLT Survey et d'un autre de 4 m, le VISTA, équipé d'une caméra infrarouge de 67 millions de pixels, la VIRCAM. Mise en service en 2011, la caméra du VLT Survey, l'OmegaCAM, comprend 32 capteurs CCD de 2Kx4K pixels d'origine Teledyne E2V, donc 268 mpixels au total. Ils sont complétés de quatre CCD servant au guidage et au pointage. La lumière arrivant sur les capteurs passe au travers de l'un des 12 filtres disponible couvrant le spectre visible du proche ultra-violet au proche infrarouge. La caméra est réfrigérée à -140°C et fonctionne sous vide.



A noter cette **intéressante vidéo** qui décrit le processus de maintenance du miroir principal des VLT. Un bâtiment lui est dédié qui le nettoie, enlève la couche existante d'aluminium puis en remet une par déposition sous vide, et elle ne pèse que 12 grammes au total !

Subaru

Basé à Hawaï, ce télescope est opéré par les Japonais. Le projet a démarré en 1991 et il est opérationnel depuis 2000. Il est alors équipé du plus gros miroir monolithique au monde avec 8,2 mètres de diamètre, dépassé ensuite par ceux du LBT, opérationnel en 2005. Sa fabrication a duré 3 ans. Il est composé d'ULE, un matériau à très faible dilatation thermique (ultra-low thermal expansion glass) concurrent du Zerodur. C'est un miroir actif doté de 261 vérins de contrôle. Le télescope a permis de nombreuses découvertes diverses et notamment sur l'expansion de l'Univers, sur le rôle de la matière noire et sur la formation des galaxies massives,



Le télescope a bénéficié de diverses mises à jour, dont un nouveau coronographe doté d'une optique adaptative en 2012 avec un miroir contrôlé par 2000 vérins en MEMS en 2013.

Large Zenith Telescope

C'est un télescope canadien doté d'un miroir de 6 m et opérationnel depuis 2005. Il est plutôt original : **son miroir est en mercure** (métal liquide à température ambiante) et sur une base tournante permettant d'obtenir naturellement une forme parabolique parfaite [source du schéma ci-dessous). La focale reste à peu près fixe car le mercure repose sur une forme parabolique de 6 cm d'épaisseur faite de PVC renforcée de fibre de verre. Il faut un litre de mercure par m² de surface à couvrir. Si des poussières s'accumulent, elles peuvent être supprimées simplement en stoppant la rotation du miroir et en les récupérant à la surface du mercure qui est bien plus dense que toutes les impuretés. Avantage : cela coûte bien moins cher qu'un télescope à base de miroir traditionnel monolithique ou même multi-miroirs. D'un facteur 50 ! Le LZT a coûté moins de \$1M à construire !

C'est l'équivalent "Makers" ou "FabLab" du télescope géant. Petits inconvénients : on ne peut réaliser d'observation qu'à la verticale du télescope, le mercure est toxique et la qualité de sa surface dépend de la régularité de la rotation et est très sensible au vent et autres vibrations ! Le LZT est situé en légère altitude au Canada (450 m), ce qui limite les risques d'évaporation du mercure mais la partie miroir du télescope est tout de même bien isolée. Le LZT est équipé d'un capteur CCD assez classique, faisant 2Kx2K pixels.

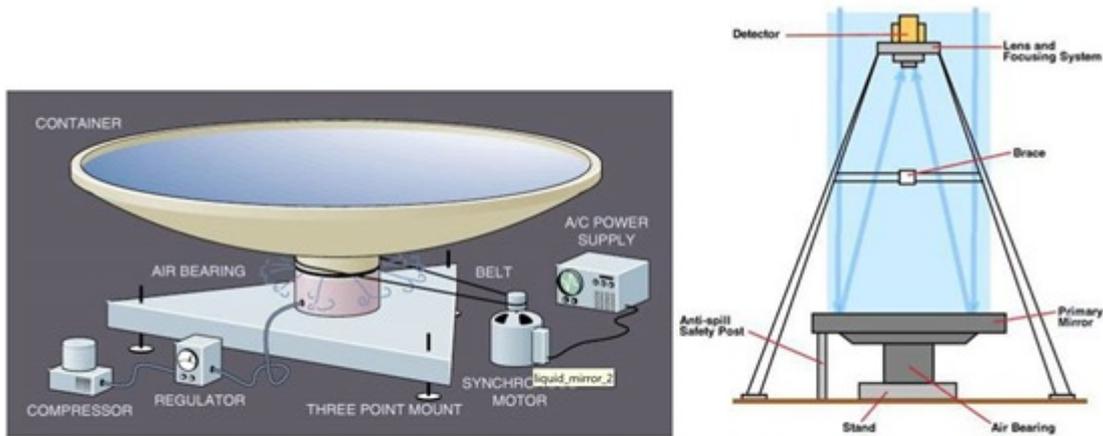


Figure 3: Main components of the liquid primary mirror and the scheme of a working liquid mirror telescope. [4] The liquid mirror is formed in the container on the air bearing. Light is then reflected to the focus, where the corrector eliminates the coma. Then light is collected on the detector. [6]

Il existe seulement trois autres télescopes dans le monde utilisant ce procédé : le LMT de l'UBC/Laval (2.65 m, lancé en 1992), le LMT de la NASA (3 m, 1995-2002 qui n'est donc plus en service) et le ILMT en Inde (4 m, fabriqué en Belgique, déployé entre 2011 et 2016).

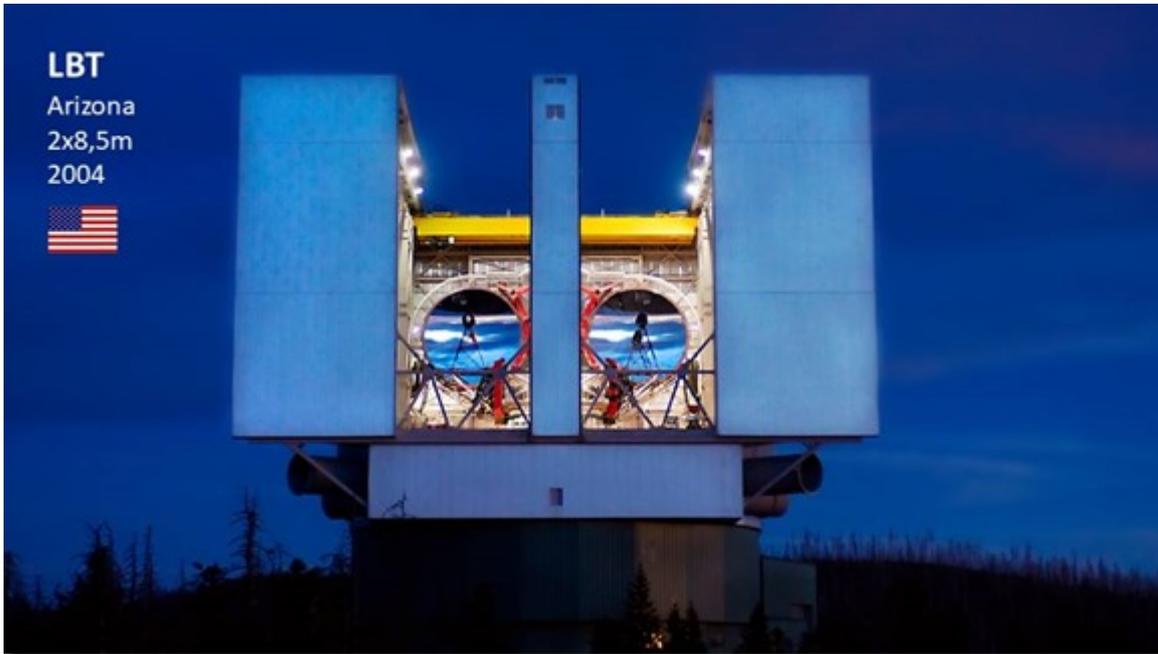
Quelques projets sont aussi dans les cartons ou déjà dans les limbes pour lancer de nouveaux télescopes à miroir en mercure :

- ALPACA (Advanced Liquid-mirror Probe for Astrophysics, Cosmology and Asteroids), qui devait être doté d'un miroir de 8 mètres au Chili et d'une caméra orientable de 240 capteurs CCDs totalisant un gigapixel.
- LAMA : qui assemblerait 18 miroirs représentant un diamètre de 50 mètres. Toujours au Canada, le système utiliserait de l'optique adaptative et de l'interférométrie optique avec assemblage par lignes à retard des images issues des 18 capteurs associés à chaque miroir.
- Divers projets d'installation de tels télescopes sur la lune, qui risquent de rester longtemps dans les cartons.

Les applications de ce genre de télescope ? Elles sont variées : analyse du transit des étoiles, recherche de quasars, calculs géométriques divers, photométrie d'étoiles, détection d'étoiles faiblement lumineuses et évolution de la formation de galaxies.

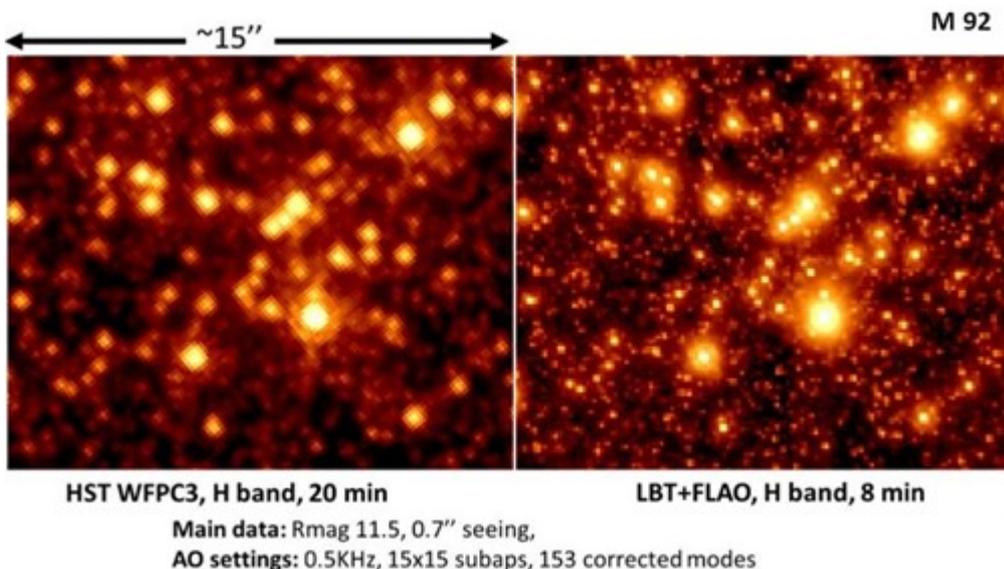
Large Binocular Telescope

Opérationnel en Arizona à 3191 m d'altitude depuis 2005, ce grand télescope est le fruit de la collaboration entre l'Université d'Arizona, l'Allemagne et l'Italie, cette dernière ayant construit la structure du télescope. La première utilisation conjointe des deux miroirs date de 2008. Les deux miroirs font 8,4 m de diamètre. Au début de leur production, ils ne faisaient qu'un pouce d'épaisseur. Ils ont été solidifiés en faisant tourner leur support dans un four à 20 tours par minute pour créer une forme parabolique parfaite. Le processus de ponçage des miroirs s'est passé en plusieurs étapes conduisant à retirer un centimètre d'épaisseur du miroir. La partie réfléchissante du miroir est une fine couche d'aluminium qui a été déposée sous vide sur le site du télescope, grâce à un énorme coffrage sous vide placé sur le miroir une fois installé sur le télescope, permettant son anodisation.



Le télescope utilise l'optique active et adaptative au niveau du miroir secondaire, celui-ci étant doté de 672 vérins magnétiques fonctionnant à la fréquence de 1 kHz pour suivre en temps réel les perturbations de l'atmosphère détectées par un LGS (laser guidance system). Un spectrographe UV est directement monté dessus.

Le LBT a été équipé comme il se doit d'un grand nombre d'instruments, mis en service progressivement. On y trouve notamment une caméra binoculaire (LBC), un spectrographe multi-objets (MODS, en 2011 et 2014) et un spectrographe dans le proche infrarouge (LUCI, en 2010 et 2013). La puissance de l'optique adaptative est illustrée par la comparaison ci-dessous entre une image du LBT et la même obtenue par la caméra WFC3 du Hubble Space Telescope, dans les deux cas, dans la bande H du proche infrarouge [source].



Une autre série d'instruments est intégrée dans le LBTI, pour le LBT Interferometer. C'est un interféromètre recombinaison la lumière issue des deux grands miroirs. Cette recombinaison prend plusieurs formes et permet d'améliorer la résolution des images prises par les deux télescopes. Ses deux instruments principaux liés à l'interféromètre sont les caméras LMIRcam (1Kx1K pixels) et NOMIC qui couvrent différentes portions de l'infrarouge.

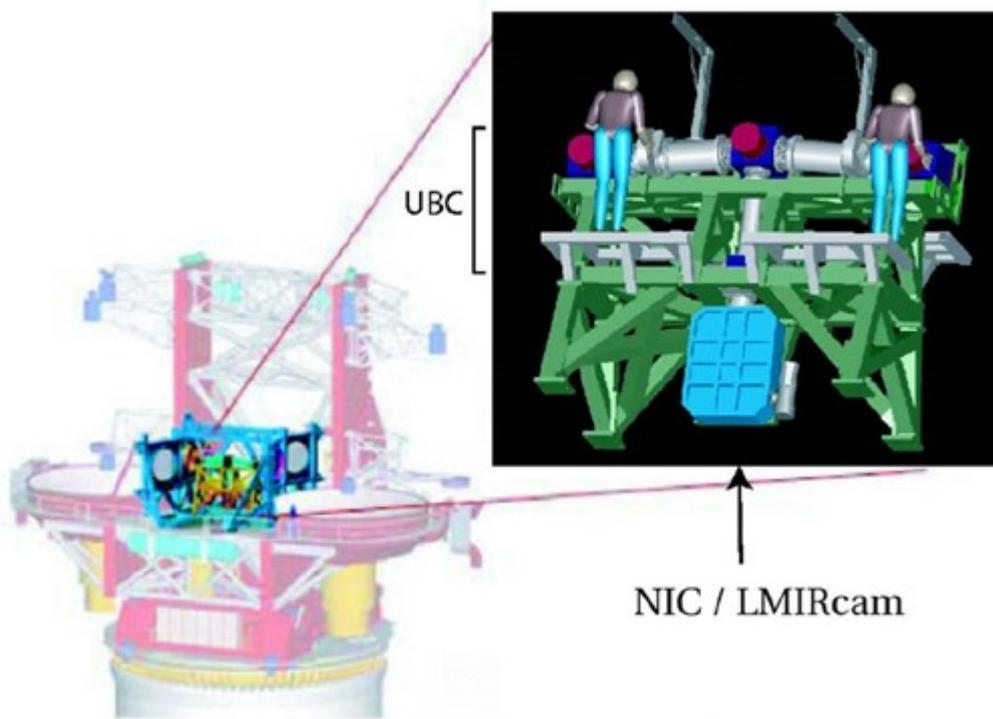
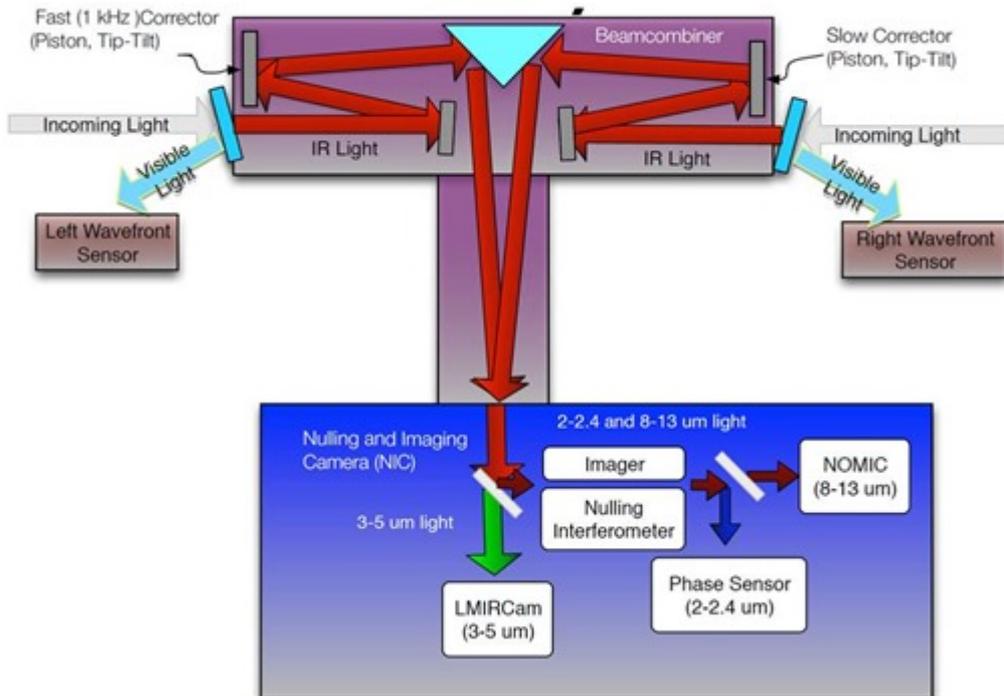


Figure 1. Location of LMIRcam within the LBT structure.

Plusieurs types d'interférométries sont possibles et notamment :

- De la **coronographie** qui permet de masquer les étoiles observées et d'observer leur périphérie et détecter des exoplanètes.
- De l'interférométrie **Fizeau**, du nom du physicien français du XIXe siècle, Hippolyte Fizeau, qui additionne les deux images en les déphasant légèrement pour tenir compte de la différence de chemin parcouru par la lumière pour atteindre l'interféromètre.
- De l'interférométrie d'**annulation** qui consiste à additionner le signal lumineux des deux télescopes en le déphasant d'une demi-longueur d'onde. Cela permet d'observer des détails très fins et faiblement lumineux... comme les exoplanètes, toujours elles, en éliminant au passage l'étoile autour desquelles elles tournent.

The LBTI



Le LBT est notamment dédié à la recherche d'exoplanètes et à l'analyse de leur atmosphère. Le LBT étudie en particulier la poussière exozodiacale, une étrange appellation décrivant l'anneau de poussière entourant les étoiles et situé dans leur zone habitable, autour d'une unité astronomique (AU = distance Soleil-Terre). Ces anneaux de poussière sont en général faits de carbone et de silicates et sont issus de comètes et d'astéroïdes. Visibles dans l'infrarouge, leur étude permet d'identifier des étoiles candidates à la recherche d'exoplanètes. Elle permet aussi d'en évaluer l'impact dans l'imagerie et l'interférométrie car ils perturbent la recherche d'exoplanètes.

Le site d'Arizona du LBT comprend aussi le Multiple Mirrors telescope, doté de 6 miroirs et opérationnel depuis 1998. C'est l'un des premiers au monde à avoir intégré un interféromètre. Il avait été initialement équipé de 7 miroirs de un mètre et a été ensuite transformé en 2006 pour n'avoir qu'un seul grand miroir de 6,5 mètres.

Cette liste n'est pas exhaustive. Dans les **grands télescopes** à miroir monolithique de plus de 5 mètres, j'ai fait l'impasse sur Magellan 1 et 2 (Chili, miroirs de 6,5 mètres) et sur le BTA-6 Russe (miroir monolithique de 6 mètres). Seuls les experts du sujet l'auront remarqué... !

Les télescopes à miroirs segmentés

Passons à la génération plus récente de télescopes utilisant des miroirs primaires construits à partir de multiples segments hexagonaux assemblés et pilotés par des systèmes mécaniques d'optique corrective et adaptative.

Keck

Il s'agit d'un couple de télescopes lancé entre 1993 et 1996 à 4200 m d'altitude sur le mont Mauna Kea à Hawaï (Keck 1 et Keck 2). Chacun des télescopes est doté d'un miroir principal de 10 mètres composé de 36 miroirs hexagonaux de 1,8 m de diamètre dont le socle en céramique présente une très faible dilatation thermique. 168 vérins sont montés derrière les miroirs pour gérer l'optique adaptative, soit trois par miroir.

C'est le premier grand télescope à avoir été doté d'un système de guidage et de correction laser. Les observations s'appuient sur de l'interférométrie dans le proche infrarouge et de la spectrographie allant du

proche ultra-violet à l'infrarouge. Elles ont permis la découverte d'un grand nombre d'exoplanètes, de mesurer la part de l'expansion de l'Univers explicable par la matière noire. Keck a aussi permis d'évaluer la masse du trou noir situé au cœur de la Voie Lactée.



Keck est un télescope relativement ancien et il a connu de nombreuses évolutions au niveau de son équipement scientifique. On trouve de nombreux spectrographes parmi ses instruments, leurs différences se situant dans leur résolution, leur champ de vision, les longueurs d'ondes explorées et leur capacité de filtrage pour réaliser des spectrographies simultanées de différents objets célestes.

- **MOSFIRE** (Multi-Object Spectrometer For Infra-Red Exploration), un spectrographe dans le proche-infrarouge multi-objets, opérationnel depuis 2012 et installé sur Keck 1. Il est équipé d'un capteur CCD de 2K x 2K pixels provenant de Teledyne E2V. Un masque permet de faire passer la lumière de manière sélective dans différents prismes qui séparent les longueurs d'onde dans l'infrarouge [source du schéma ci-dessous : MOSFIRE, the Multi-Object Spectrometer For Infra-Red Exploration at the Keck Observatory].



Figure 7. On the left is the layout of the MOSFIRE field on the sky with a 58s J-band image of The Antennae galaxies. The middle image is of a slit mask and the right image is the night sky emission with this mask in H-band.

- **DEIMOS** (Deep Extragalactic Imaging Multi-Object Spectrograph), un spectrographe capable d'analyser jusqu'à 1200 objets célestes en une seule exposition. Il est doté d'une matrice de huit capteurs CCD de 2K x 4K totalisant 8K x 8K pixels. Il est plus ancien que le MOSFIRE, ayant été lancé à la fin des années 1990. Son champ de vision relativement large lui sert à analyser la périphérie de galaxies et leur composition chimique.

- **HIRES** (High Resolution Echelle Spectrometer) est un spectrographe à haute résolution opérationnel depuis 1993 et mis à jour en 2004 avec une matrice de trois capteurs CCD de 2Kx2K pixels remplaçant un capteur unique et moins sensible de 2Kx2K pixels. La lecture des images du CCD est aussi bien plus rapide. Il fonctionne dans le proche UV et dans le visible. Il a permis la détection de nombreuses exoplanètes. C'est l'instrument terrestre le plus prolifique de ce point de vue-là. Il était concurrencé par le télescope spatial Kepler, spécialisé dans la détection d'exoplanètes.
- **LRIS** (Low Resolution Imaging Spectrograph) est un spectrographe à basse résolution adapté à l'analyse d'objets très distants de l'Univers. Il est doté de deux caméras, une pour le bleu et l'autre pour le rouge visibles, via des capteurs CCD de 2Kx2K pixels. Il explore la composition des galaxies les plus anciennes de l'Univers. Il date des années 1990.
- **NIRC-2** (Near Infrared Camera 2) est la seconde génération de caméra infrarouge du télescope, couplée à l'optique adaptative. Elle est utilisée pour cartographier des objets du système solaire, pour détecter des exoplanètes et analyser la structure de galaxies. Elle a permis la détection en 2008 d'un système avec quatre planètes autour de l'étoile HR 8799 par Christian Marois.
- **NIRSPEC** (Near Infrared Spectrometer) étudie notamment le red-shift (décalage vers le rouge) des galaxies et d'étoiles proches du centre de la Voie Lactée. Il doit être mis à jour en 2017.
- **OSIRIS** (OH-Suppressing Infrared Imaging Spectrograph) est un autre spectrographe infrarouge. Il permet de réaliser des images d'objets en filtrant certaines longueurs d'ondes infrarouge. Il est installé sur Keck 1.
- **Keck Interferometer** : cet instrument combine la lumière de Keck 1 et Keck 2 dans un interféromètre, ce qui permet d'améliorer la résolution angulaire des images captées. L'instrument est en jachère depuis 2012, faute de financements pour le faire évoluer !
- **KCWI** (Keck Cosmic Web Imager) est un nouveau spectrographe développé pour Keck 2 qui est en cours d'installation et qui sera dédié à l'observation de galaxies et trous noirs éloignés de plusieurs milliards d'années lumières. Il fonctionnera dans le bleu et dans le rouge visibles. Cet instrument des plus complexes utilise un IFU (Integral Field Unit) originaire de la société française d'optique Winlight créée en 2001.

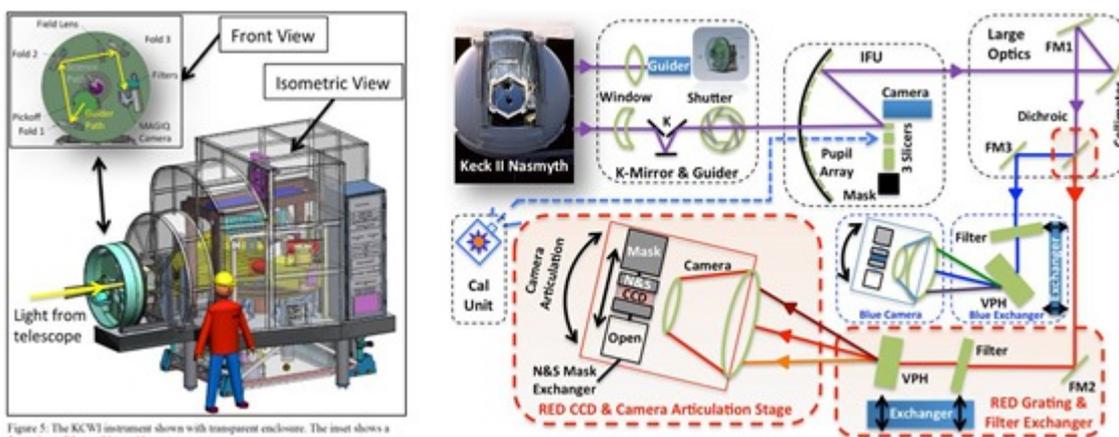


Figure 5. The KCWI instrument shown with transparent enclosure. The inset shows a front view of the tracking guide.

- **Keck Planet Finder**, est un instrument qui doit rentrer en service en 2019. Il doit servir à détecter des exoplanètes par la méthode des transits, en explorant une large partie du ciel.

Comme de nombreux télescopes terrestres, leur activité sera concurrencée à partir de 2019 par celle du

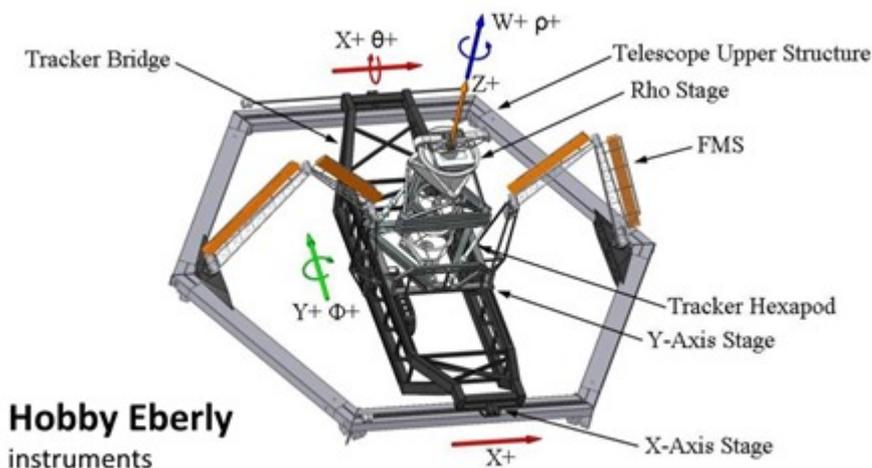
télescope spatial JWST dont nous ferons un tour dans un article suivant. Celui-ci est doté d'un ensemble de miroirs de 6,2 m de diamètres. Les télescopes terrestres continueront de se distinguer du JWST par la résolution angulaire de leurs observations, permise par de plus grands miroirs et par l'interférométrie associant plusieurs miroirs. JWST se distinguera de son côté par la capacité à observer des objets très éloignés et à le faire dans l'infrarouge moyen, qui est inaccessible sur terre à cause de l'atmosphère.

Hobby Eberly

Ce télescope est installé depuis 1996 au Texas. Il résulte d'un partenariat entre universités américaines, allemands et hollandaises. Son miroir principal qui fait 11 mètres de diamètre est fixe, ce qui rend son architecture plus simple. C'est le plus grand miroir de ce genre à ce jour. Il est composé de 91 miroirs hexagonaux d'un mètre de diamètre. Il est doté de trois spectrographes qui se distinguent par leur résolution spectrale (haute, moyenne et basse).



Le miroir secondaire et ses instruments est mobile, permettant le suivi d'objets célestes en déplacement. Une partie des instruments a été mise à jour au début des années 2000. Je vous passe les détails !



Gemini Twins

Les Gemini Twins sont une paire de télescopes anglais installés respectivement au Chili (Gemini South) et à Hawaï (Gemini North). Ils ont chacun un miroir de 8,1 m composé de 55 segments hexagonaux. Ils ont été terminés respectivement en 1999 et 2000. Ils observent le ciel dans le visible et l'infrarouge. Malheureusement, ils n'ont pas produit grand-chose du fait de débuts chaotiques. Ils sont cependant bien opérationnels.



Les deux télescopes ont été équipés en 2012 d'un système d'optique adaptative dans leur miroir secondaire (originnaire de Safran Reosc), exploitant comme il se doit un laser de pointage au sodium qui envoie cinq rayons (*ci-dessous*). Le miroir adaptatif est contrôlé par 64×64 vérins en MEMS.



South African Large Telescope (SALT)

Ce télescope opérationnel depuis 2005 comprend un grand miroir de 11 mètres constitué de 91 miroirs hexagonaux. C'est visiblement le plus grand de sa catégorie. Le "Large" est donc toujours valable 12 ans après l'inauguration ! Mais la mise au point de ce grand télescope a pris plusieurs années.



L'équipement du SALT est varié comme pour tous les grands télescopes. Il comprend un dispositif de photométrie permettant de suivre dans le temps l'évolution de la luminosité des étoiles et galaxies, la suivant à 20 Hz, ce qui doit générer de gros volumes de données. Il comprend aussi un spectrographe dans l'ultraviolet et un spectrographe dans le visible et le proche infrarouge. Il est spécialisé notamment dans la détection d'astéroïdes et la spectroscopie de galaxies.

Grand Télescope des Canaries

Opérationnel depuis 2007, 20 ans après son planning initial en 1987 et situé à 2267 m d'altitude aux Canaries, ce télescope est doté d'un miroir principal de 10,4 m de diamètre comprenant un assemblage de 36 miroirs hexagonaux complétés par un dispositif d'optique active, le tout provenant aussi de Safran Reosc. Il résulte d'un partenariat entre des organismes de recherche espagnols, mexicains et américains sachant que les espagnols en sont les premiers contributeurs et utilisateurs (à 90%).



Il dispose d'un équipement que nous avons déjà vu dans les nombreux autres télescopes de cet article : un capteur dans l'infrarouge moyen couplé à un spectrographe, un coronographe et un polarimètre (qui mesure la polarité de la lumière reçue). La réfrigération est assurée à -245°C pour l'installation et à -265°C pour le capteur. Un capteur dans l'infrarouge moyen doit être plus refroidi que dans le proche infrarouge ! Il est aussi doté d'un spectrographe multi-objets suivant jusqu'à 92 objets dans le proche infrarouge (OSIRIS) et un autre dans le visible (MEGARA). Ils utilisent des faisceaux de fibres optiques pour récupérer la lumière et l'envoyer

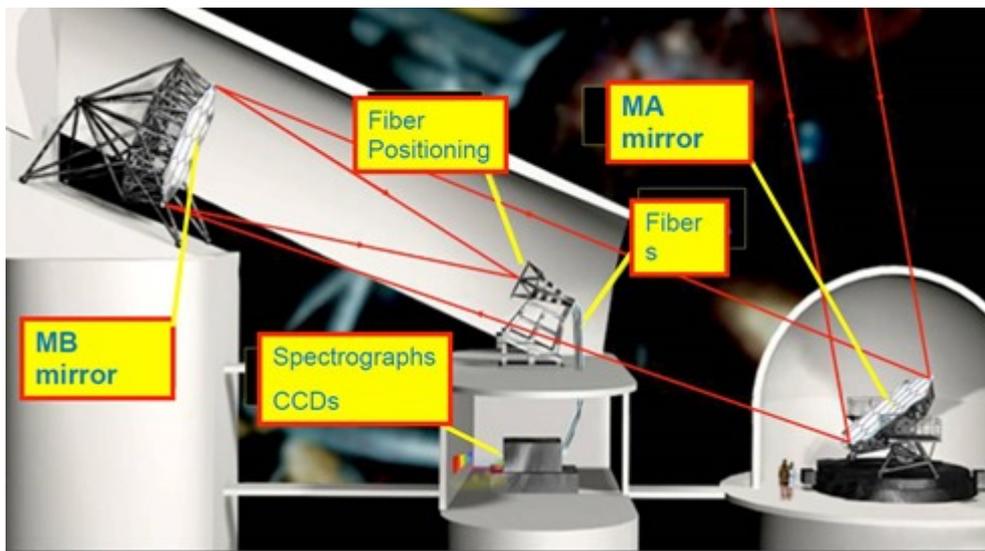
dans les spectrographes.

LAMOST Hebei

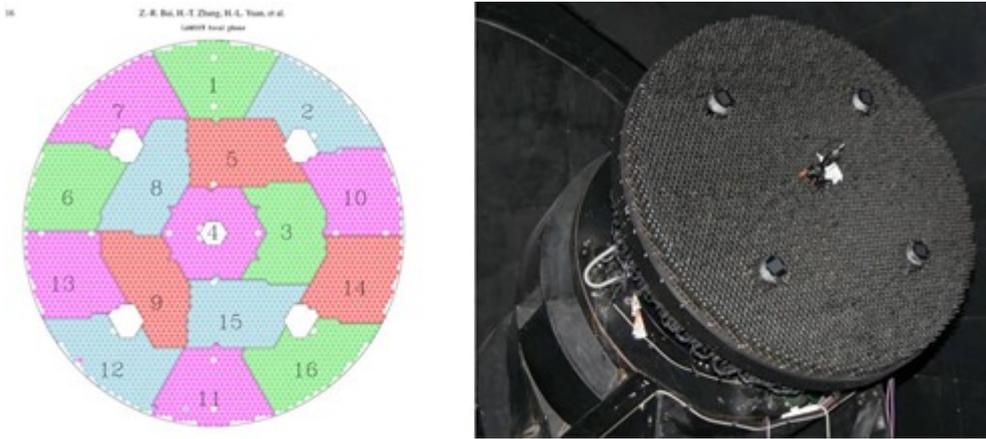
Dernier télescope de cette série, le LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope) est un télescope chinois basé à Xinglong Station (ça ne s'invente pas) dans la province de Hebei. Il est actif depuis 2008 et véritablement opérationnel depuis 2012. Contrairement au radiotélescope FAST que nous verrons plus tard, les chinois n'ont pas donné dans le gigantisme avec ce télescope. Son miroir fait 4 mètres de diamètre. Il est dédié à la spectrographie de 10 millions d'étoiles de notre Voie Lactée et de millions de galaxies.



L'installation optique est plutôt originale (schéma ci-dessous) puisque nous avons un premier miroir plat et orientable de 24 segments hexagonaux de 1,1 mètre faisant 5,72×4,4 m qui réfléchit la lumière sur un second miroir sphérique de 37 segments faisant 6,67×6,09 m.



Ce dernier fait converger les rayons dans un plan focal de 1,75 m de large où se trouvent 4000 fibres optiques positionnées par 8000 moteurs. L'optique est adaptative. Les fibres alimentent par paquet de 250 les 16 spectrographes qui sont situés en-dessous du plan de focale. Chaque spectrographe est équipé de deux capteur CCD de 4Kx4K pixels originaire de Teledyne E2V, adaptés l'un au bleu et l'autre au rouge.



Les objectifs de ce télescope sont de réaliser des spectrographies de grandes structures dans l'univers (galaxies et quasars, qui sont des galaxies très énergétiques) et d'étoiles de la Voie Lactée. Il a notamment permis de découvrir des étoiles binaires et des étoiles géantes dans la Voie Lactée après le début de sa cartographie systématique.

Réserver son télescope

Vous vous demandez peut-être comment les astronomes font-ils pour accéder aux télescopes. Heureusement pour leurs rythmes circadiens, ils ne sont pas obligés de se déplacer à Hawaï ou dans la pampa chilienne. Ils commandent leurs observations par Internet et reçoivent les résultats par le même chemin ! Tous les six mois en général, mais cela peut-être sur une période mensuelle ou annuelle, les grands télescopes internationaux – terrestres et spatiaux – sont ouverts aux demandes d'observation (Telescope Application Form). Seuls les chercheurs, doctorants et étudiants en astronomie sont acceptés, et en priorité ceux dont les pays ont cofinancé les télescopes demandés. Il faut évidemment aussi savoir quel instrument sélectionner vu leur nombre ! La liste est ainsi fournie sur les sites des télescopes comme pour l'observatoire américain **Keck** ou pour le **SALT** d'Afrique du Sud.

Les demandes sont ensuite examinées par un comité scientifique et les slots alloués, le taux de succès des demandes variant selon les télescopes. Comme pour préparer son pitch de startup, il existe des conseils pour bien préparer ses demandes d'observations (**exemple**). On peut alors devoir attendre plusieurs mois avant que le télescope aille observer le bout de ciel demandé. Voici la **liste des demandes** récemment approuvées par l'European Southern Observatory qui couvre notamment le VLT évoqué dans cet article.

Les chercheurs en astronomie doivent dans la pratique savoir taper à plusieurs portes. Les différents télescopes terrestres et spatiaux disposent d'instruments complémentaires et qui évoluent régulièrement. Un travail de recherche va donc facilement nécessiter de faire appel à plusieurs d'entre eux. C'est particulièrement vrai pour l'étude des galaxies et la recherche d'exoplanètes. Certaines peuvent être découvertes en premier via un télescope spatial (Hubble pour les galaxies, Kepler pour les exoplanètes) et être ensuite examinées par d'autres méthodes via des télescopes terrestres. Ce sera encore plus le cas lorsque le James Webb Space Telescope et les télescopes géants seront opérationnels aux débuts de la prochaine décennie.

La recherche en astronomie et astrophysique est assez ouverte. Les travaux sont régulièrement publiés tout comme les observations réalisées avec les télescopes. Qui plus est, de nombreuses observations télescopiques déjà réalisées sont accessibles pour les profanes sur Internet, et notamment sur **Worldwidetelescope** ou sur **Eyesofuniverse** où vous pouvez télécharger 230 Go d'images si cela vous chante. Paradoxalement, c'est un bon moyen de faire une belle cure de digital detox !

Ce parcours un peu longuet n'est pas terminé pour autant ! Dans l'**épisode suivant**, je vais me pencher sur les télescopes géants qui sont actuellement en construction. Et notamment l'EELT Européen qui sera doté d'un miroir de 39 mètres de diamètre, environ quatre fois le record actuel. Le Guinness n'a qu'à bien se tenir ! Nous examinerons aussi la partie big data de certains de ces télescopes ! Puis après, nous passerons aux radio-télescopes, aux télescopes spatiaux, à la recherche d'exoplanètes et enfin, terminerons par les entrepreneurs de l'espace et leurs ambitions qui, en règle générale, sont très éloignées des télescopes.

Voici les pointeurs sur les douze épisodes de cette série dans leur ordre de parution :

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : l'Univers

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes terrestres

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : grands télescopes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes géants

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : radiotélescopes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : interféromètres

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans le visible

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans l'infrarouge

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans les rayons gamma, X et UV et ondes radio

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : les exoplanètes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : entrepreneurs

Cet article a été publié le 27 juin 2017 et édité en PDF le 23 mars 2024.
(cc) Olivier Ezratty – “Opinions Libres” – <https://www.oezratty.net>