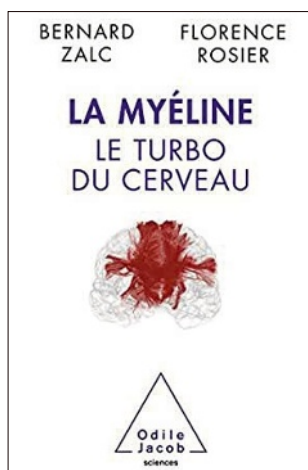




Dans cet ouvrage, Bernard Zalc et Florence Rosier proposent un voyage passionnant et didactique dans le monde myélinisé.

Morris dans les années 1980. Dans une piscine ronde à bord vertical, on place une petite plateforme à fleur d'eau et invisible. Quand on dépose un rat ou une souris dans l'eau, l'animal n'a d'autre choix que de nager jusqu'à ce qu'il trouve la plateforme et monte dessus. Mais si vous répétez cette même expérience tous les jours, l'animal finit par mémoriser l'endroit où se situe la plateforme et s'y rend directement, quel que soit l'endroit où vous le mettez au départ. D'une part, l'équipe de Paul Frankland a montré que les souris qui acquièrent cette capacité synthétisent de nouveaux oligodendrocytes, et donc de nouvelles gaines de myéline. D'autre part, et c'est plus intéressant encore, elle a observé que si l'on inhibe la myélinisation pendant cette période d'apprentissage (les souris produisent toujours des précurseurs des oligodendrocytes, mais ceux-ci ne peuvent plus devenir matures et produire de la myéline), les souris apprennent toujours correctement, mais un mois plus tard, elles sont incapables de retrouver la plateforme, contrairement aux souris contrôles, qui la retrouvent immédiatement.

La myéline interviendrait donc dans la mémoire à long terme ?

Absolument. C'est la première fois que l'on met en évidence le fait que les circuits de la mémoire sont myélinisés et peuvent se myéliniser chez l'adulte. Ce travail a été confirmé par Jonah Chan, de l'université de Californie à San Francisco, et ses collègues. Cette découverte est très importante. Cela pourrait notamment aider à mieux comprendre les troubles cognitifs observés au cours des maladies qui touchent la myéline, comme la sclérose en plaques.

Ces maladies sont associées à des pertes de mémoire ?

Il est vrai que la sclérose en plaques, par exemple, se manifeste surtout par un handicap moteur, des troubles digestifs et des douleurs. Mais quand on suit des patients, on s'aperçoit que nombre d'entre eux ont aussi

des problèmes cognitifs. On n'a jamais trop compris pourquoi, et voici la démonstration que ces troubles cognitifs sont dus au fait que des circuits neuronaux doivent être myélinisés pour mettre en place les apprentissages cognitifs perturbés chez ces patients.

Des troubles de la myéline seraient-ils aussi impliqués dans des maladies psychiatriques ?

Il est très difficile de répondre à cette question, essentiellement parce qu'on manque de modèles expérimentaux. Pour modéliser la dépression, par exemple, on met des souris en isolement. On n'a rien trouvé de mieux, mais cela ne reproduit pas exactement l'état de santé d'un patient déprimé. Quant aux interprétations des observations faites chez les humains, elles laissent les chercheurs dubitatifs. Que conclure quand on observe que chez les schizophrènes, le diamètre du corps calleux est réduit ? Qu'ils fabriquent moins de myéline ou qu'ils la perdent parce qu'ils ont perdu des neurones et donc leur gaine ?

Existe-t-il un lien entre problèmes de myélinisation et maladie d'Alzheimer ou, à l'inverse, la myéline protégerait-elle les neurones contre cette maladie ?

En 1996, des chercheurs de l'université L. W. Goethe, à Francfort – Heiko et Eva Braak – ont avancé une idée intéressante. Selon eux, les zones où les pertes de neurones sont les plus précoces chez les patients atteints de la maladie sont celles qui, au cours du développement, ont été myélinisées en dernier. En gros, il y aurait deux gradients dans le cerveau : un gradient de myélinisation qui va du tronc cérébral vers l'avant du cerveau et un gradient de perte neuronale qui va en sens inverse. En d'autres termes, plus une région a été myélinisée tôt, plus elle est protégée de la perte neuronale liée à la maladie d'Alzheimer. Mais il s'agit juste d'un constat, sur des patients, sans explication.

Avec toutes ces avancées, la myéline est-elle toujours le parent pauvre des neurosciences ?

Les neurobiologistes sont encore loin d'avoir une vision d'ensemble de tout ce qui se passe lors de l'apprentissage et de la mémorisation, mais on peut dire deux choses. La première, c'est que la myélinisation est un moteur de l'apprentissage, et ce tout au long de la vie. La seconde, c'est que pour retenir, il faut myéliniser, sinon on oublie. La myéline joue donc un rôle fondamental dans deux fonctions clés du cerveau. Il reste à comprendre comment la taille des nœuds de Ranvier s'établit et comment les cellules « savent » ce qu'elles doivent faire, quels signaux orchestrent tout à la milliseconde près. On n'a pas encore d'explication à ce phénomène fascinant. ■

Propos recueillis
par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

B. Zalc et F. Rosier, **La Myéline, le turbo du cerveau**, Odile Jacob, 2016.

S. Pan et al., **Preservation of a remote fear memory requires new myelin formation**, *Nature Neuroscience*, en ligne le 10 février 2020.

F. Wang et al., **Myelin degeneration and diminished myelin renewal contribute to age-related deficits in memory**, *Nature Neuroscience*, en ligne le 10 février 2020.

P. E. Steadman et al., **Disruption of oligodendrogenesis impairs memory consolidation in adult mice**, *Neuron*, vol. 105 (1), pp. 150-164.e6, 2020.

C. C. H. Cohen et al., **Saltatory conduction along myelinated axons involves a periaxonal nanocircuit**, *Cell*, vol. 180(2), pp. 311-322.e15, 2020.

S. G. Brohawn et al., **The mechanosensitive ion channel TRAAK is localized to the mammalian node of Ranvier**, *eLife*, vol. 8, article e50403, 2019.

H. Kanda et al., **TREK-1 and TRAAK are principal K⁺ channels at the nodes of Ranvier for rapid action potential conduction on mammalian myelinated afferent nerves**, *Neuron*, vol. 104(5), pp. 960-971.e7, 2019.

C. Demerens et al., **Induction of myelination in the central nervous system by electrical activity**, *PNAS*, vol. 93(18), pp. 9887-9892, 1996.

L'ESSENTIEL

> Au Chili, l'Observatoire européen austral (ESO) a commencé la construction du *Télescope géant européen (ELT)*. Ce sera le plus grand télescope optique de l'histoire de l'astronomie.

> L'*ELT* démarrera ses observations en 2026. Il accédera à des objets extrêmement ténus et lointains

avec des résolutions de l'ordre de la milliseconde d'arc.

> La construction et le fonctionnement d'un télescope aussi grand présentent de très nombreux défis techniques.

LES AUTEURS



XAVIER BARCONS
directeur général
de l'ESO



JUAN CARLOS GONZÁLEZ HERRERA
directeur
de l'ingénierie
des systèmes
pour le projet
de construction
de l'*ELT*



AUGUSTÍN SÁNCHEZ LAVEGA
professeur de
physique appliquée
à l'université
du Pays basque,
à Bilbao, et membre
de l'équipe
scientifique de l'*ELT*

ELT

Le plus grand œil de la planète

Du Système solaire aux premières étoiles de l'Univers, le télescope géant européen ELT observera dans quelques années le cosmos avec un luxe de détails sans précédent.



DES ÉTOILES ARTIFICIELLES

Les télescopes actuels disposent de systèmes d'optique adaptative qui corrigent en temps réel les distorsions de l'image dues aux turbulences atmosphériques. Pour cela, ils doivent observer en continu des étoiles suffisamment brillantes qui servent de référence. Mais de telles étoiles sont assez rares. C'est pourquoi l'ELT disposera de huit lasers avec lesquels il générera autant d'étoiles artificielles dans n'importe quelle partie de la voûte céleste.

En 1610, Galilée pointa vers le ciel une lunette de quelques centimètres de diamètre et observa pour la première fois les lunes de Jupiter. Cette découverte a soulevé un coin de voile sur la véritable organisation de notre environnement cosmique proche. Elle a aussi constitué la naissance de l'astronomie observationnelle moderne: l'étude de l'Univers à l'aide d'instruments toujours plus puissants et précis.

Depuis, les découvertes n'ont cessé de se succéder. Trois siècles après l'exploit de Galilée, la mise en service du télescope de 2,5 mètres de diamètre à l'observatoire du mont Wilson a permis de mesurer la distance de nombreuses galaxies et d'établir la réalité de l'expansion de l'Univers. À la fin des années 1950, le télescope de 5 mètres du mont Palomar a contribué à la détection des quasars, ces noyaux actifs de galaxies dont les astronomes se servent aujourd'hui pour sonder les confins de l'Univers observable. En 2004, le VLT (*Very Large Telescope*) de 8,2 mètres, construit au Chili, a réalisé la première image d'une planète située hors du Système solaire.

UN OBSERVATOIRE GIGANTESQUE DANS LE DÉSERT CHILIEN

Ce ne sont là que quelques exemples. La construction de télescopes toujours plus grands a, à chaque fois, repoussé un peu plus loin notre compréhension de l'Univers. C'est pourquoi, il y a près de vingt ans, l'Organisation européenne pour les observations astronomiques dans l'hémisphère austral (plus connue sous le nom d'Observatoire européen Austral ou ESO) a entamé l'étude préliminaire de l'instrument qui, dans très peu de temps, sera le plus grand télescope optique de l'histoire: le *Télescope géant européen* ou *ELT*, pour l'anglais *Extremely Large Telescope*.

Cet observatoire gigantesque sera installé sur le Cerro Armazones, dans le désert chilien de l'Atacama, et on espère qu'il verra sa première lumière en 2025. En plus de son instrumentation de pointe, l'aspect le plus notable de ce nouveau télescope sera son miroir primaire dont le diamètre atteindra presque 40 mètres – sa surface sera équivalente à celle de trois terrains de basket.

De telles dimensions sont inédites dans l'histoire de l'astronomie et impliquent un saut qualitatif par rapport aux plus grands instruments actuellement en service. Les deux télescopes de l'observatoire Keck, à Hawaï, et le *Grand Télescope des Canaries*, ou *GTC*, sur l'île de la Palma (le plus grand engin de ce type en fonctionnement aujourd'hui), disposent de miroirs dont les diamètres sont de l'ordre de 10 mètres et les surfaces 14 fois inférieures à

celle du futur miroir principal de l'*ELT*.

La construction d'un observatoire de cette taille nécessite de relever une longue série de défis techniques. Cependant, à l'image de ce qui s'est passé lors de la transition des miroirs de 2 à 4 mètres, puis des miroirs de 4 à 8 et 10 mètres, les progrès techniques dans ce domaine rendent désormais cet objectif à la fois techniquement et financièrement viable.

La justification scientifique de ce saut qualitatif réside dans le fait que pour un télescope – un instrument astronomique qui exploite la réflexion de la lumière, comme l'*ELT* –, le diamètre du miroir primaire détermine deux caractéristiques essentielles: la quantité de lumière qu'il capte et son pouvoir de résolution.

L'instrument est capable d'observer des objets d'autant plus ténus et éloignés que la première de ces caractéristiques, la quantité de lumière recueillie, est grande. Quant à la seconde, la résolution, elle mesure sa capacité à distinguer l'un de l'autre deux objets très proches sur la voûte céleste. Les lois de l'optique indiquent que la quantité de lumière reçue augmente en raison de l'aire du miroir, tandis que le pouvoir de résolution le fait en proportion du rayon. Par conséquent, ces deux quantités seront respectivement 14 et 4 fois plus élevées pour l'*ELT* que pour le *GTC*.

L'*ELT* observera une plage du spectre électromagnétique allant du visible à l'infrarouge proche. Ce type d'astronomie qualifiée «d'optique» (par opposition à l'astronomie X ou à la radioastronomie, par exemple) est

Un emplacement idéal: l'*ELT* s'élèvera au sommet du Cerro Armazones, dans le désert chilien de l'Atacama. À 3 000 mètres d'altitude, le lieu se distingue par l'exceptionnelle qualité de son ciel. Cette image aérienne récente montre l'état d'avancement des travaux de terrassement.





Les systèmes optiques et mécaniques de l'ELT constituent un gigantesque défi



particulièrement adapté à l'étude des étoiles ou des galaxies. Les caractéristiques de l'ELT lui permettront notamment d'analyser l'atmosphère des exoplanètes et d'y chercher des indices d'activité biologique. Il sera capable de détecter la structure et la composition de galaxies lointaines, d'observer en détail les effets des trous noirs supermassifs tapis au centre des galaxies, et de mesurer directement l'accélération de l'expansion cosmique. Les objectifs scientifiques de l'ELT sont nombreux, divers et ils transformeront nos connaissances dans tous les domaines de l'astronomie et de l'astrophysique, du plus proche au plus lointain.

UN PROJET EUROPÉEN QUI S'EST CONCRÉTISÉ EN 2014

À une époque où il n'y a plus de course à l'espace entre les grandes puissances, il n'est pas étonnant que la coopération internationale règne quand il s'agit de construire de grands observatoires. De ce point de vue, l'Europe a pris l'initiative en 1962 lors de la création de l'ESO, auquel adhèrent désormais 16 pays. Ce geste, qui était il y a plus d'un demi-siècle un acte de survie pour l'astronomie européenne, a fini par la placer à la première place mondiale dans le domaine de l'observation depuis le sol. L'effort n'a pas été vain. Le plus puissant complexe d'astronomie optique du monde est actuellement le VLT, un ensemble de quatre télescopes de 8,2 mètres de diamètre installés par l'ESO dans son observatoire du Cerro Paranal, dans le désert de l'Atacama, région réputée pour être la plus aride de la planète.

Du côté de l'astronomie des grandes longueurs d'onde, la coopération internationale a battu des records avec la construction d'*Alma*, ou *Grand réseau d'antennes millimétrique/submillimétrique de l'Atacama* (l'acronyme anglais *Alma* signifie « âme » en espagnol), un radiotélescope de 66 antennes né de la collaboration de l'Europe (ESO), de l'Amérique (États-Unis et Canada)

et de l'Asie (Japon, Taïwan et Corée du Sud). Cette installation inaugurée en 2013 offre des possibilités uniques d'observation de l'Univers froid (gaz et poussière interstellaire, disques protoplanétaires, etc.) et fait l'objet d'une intense compétition entre équipes d'astronomie pour obtenir du temps d'observation.

Toutefois, lorsqu'il s'est agi d'accéder à la prochaine génération de télescopes optiques, la stratégie à l'origine du succès d'*Alma* n'a pas été reproduite. Il existe actuellement trois projets de construction de télescopes géants dotés de miroirs de plus de 20 mètres de diamètre. Deux d'entre eux, le *Giant Magellan Telescope* ou GMT (24 mètres) et le *Thirty Meter Telescope* (TMT) sont à l'initiative de différents instituts de recherche américains. L'Europe, de son côté, a misé depuis des années sur l'ELT.

Après une longue période d'études préliminaires sur différents concepts, l'ESO a opté pour un système fondé sur un miroir de 39,3 mètres. En 2010, il a été décidé de l'installer sur le Cerro Armazones. Le terrain, situé à une altitude de 3060 mètres, a été accordé par le gouvernement chilien à l'ESO dans le but d'y installer cet observatoire. En plus de l'excellente qualité du ciel, le fait qu'Armazones et Paranal se trouvent à moins de 20 kilomètres l'un de l'autre permettra d'opérer l'ELT comme un instrument de l'observatoire de Paranal.

Le coût direct de la construction de l'ELT est estimé à 1,2 milliard d'euros, financés par les pays membres de l'ESO. À la différence des projets américains, l'ESO a décidé de ne pas démarrer la construction de l'ELT avant de s'être assuré de 90 % de son financement, un objectif atteint en 2014. En 2015, la route d'accès au Cerro Armazones a été achevée et le terrassement du sommet pour accueillir le gros œuvre a débuté. Après le creusement des fondations, terminé en 2018, les étapes suivantes seront le coulage du béton et l'installation des systèmes d'amortissement antisismiques. Suivra la construction du bâtiment de service et de la coupole où sera ensuite installée la monture du télescope.

Le véritable cœur de l'ELT, l'ensemble de ses systèmes optiques et mécaniques, constitue un gigantesque défi. Au moment où nous écrivons, l'industrie européenne est déjà à pied d'œuvre pour produire l'ensemble de ses éléments, y compris les miroirs, leurs supports, les actionneurs, capteurs et bien d'autres. La première lumière pour des calibrages techniques est prévue pour 2025 ; après quoi, l'instrumentation sera installée afin de démarrer les opérations scientifiques en 2026.

L'ELT sera essentiellement composé du télescope, de son instrumentation scientifique et de leurs structures de support respectives. La fonction du télescope est de collecter la lumière visible et infrarouge émise par l'objet étudié et, ➤

> moyennant une succession de six miroirs (le primaire et cinq miroirs secondaires), de former une image dans le plan focal. Celle-ci s'étendra sur une surface d'environ 2 mètres de diamètre, correspondant à 10 minutes d'arc dans le ciel (environ un tiers du diamètre de la pleine lune).

HUIT INSTRUMENTS

Les instruments scientifiques sont chargés de traiter l'image produite par le télescope selon les besoins (imagerie, spectroscopie, coronographie, etc.). Afin de maximiser l'efficacité de l'observatoire, le télescope compte huit stations focales permettant d'installer jusqu'à huit instruments différents (bien qu'un seul puisse être actif à chaque instant). Si le télescope et ses structures de support sont des éléments pérennes maintenus tout au long de la vie utile

de l'observatoire (en général plusieurs décennies), les instruments ont une vie plus courte, de l'ordre de dix ans. C'est cette évolution de l'instrumentation qui permet aux observatoires astronomiques de se maintenir en permanence à la pointe de la recherche scientifique.

Grâce à son gigantesque miroir primaire, l'ELT sera capable de distinguer deux objets séparés dans le ciel d'à peine 5 millisecondes d'arc. Cela représente un pouvoir de résolution 12000 fois supérieur à celui de l'œil humain, 16 fois supérieur à celui du télescope spatial *Hubble* et 4 fois supérieur à celui du *GTC*. Quant à la quantité de lumière captée, qui détermine sa sensibilité, l'ELT disposera d'une surface collectrice de 978 mètres carrés, face aux 655 du *TMT*, aux 368 du *GMT*, aux 74 du *GTC* ou aux 4,5 de *Hubble*.

COMMENT FONCTIONNE UN TÉLESCOPE DE 40 MÈTRES

La principale caractéristique de l'ELT sera son immense miroir primaire d'un diamètre de 39,3 mètres. L'observatoire sera aussi équipé de différents instruments qui lui permettront d'analyser la lumière émise par les objets célestes. De par ces dimensions colossales, le principal défi sera

de contrecarrer les différentes perturbations que subira le télescope aussi bien du fait de sa propre structure que des perturbations atmosphériques. Ce schéma montre la structure interne – sans la coupole de protection – de l'observatoire.

Monture d'altitude
(pivote autour de l'axe horizontal)

MIROIR PRIMAIRE

La taille du miroir primaire détermine deux grandeurs cruciales : la quantité de lumière que collecte le télescope (et donc sa capacité à détecter des objets peu lumineux et lointains) et son pouvoir de résolution (la possibilité de séparer deux objets très proches sur la voûte céleste). Pour l'ELT, ces grandeurs seront respectivement 14 et 4 fois supérieures à celles du plus grand télescope optique actuellement en service.

INSTRUMENTATION SCIENTIFIQUE

Une fois collectée la lumière de l'objet astronomique étudié, divers instruments se chargeront de l'analyser en fonction des propriétés recherchées. Les premiers installés seront la caméra infrarouge *Micado*, le spectrographe visible et infrarouge *Harmoni* et la caméra spectrographique infrarouge *Metis*.

PERTURBATIONS

À cause de ses grandes dimensions, l'ELT sera très sensible aux perturbations affectant la structure ou les miroirs. Faute de les corriger, l'image serait dégradée au point que les avantages d'un télescope géant seraient perdus. De telles perturbations peuvent provenir entre autres du poids de la monture en altitude elle-même, des changements ou des différences de température, voire du vent. Un système automatisé les détecte et les corrige en temps réel en déformant et en déplaçant les miroirs.

OPTIQUE ADAPTATIVE

Les mouvements de l'air troublent la lumière des objets célestes avant qu'elle n'arrive au télescope. Pour éviter ces effets, l'ELT disposera d'un système d'optique adaptative : un miroir dont la surface est déformable corrige en temps réel les déformations de l'image provoquées par les turbulences atmosphériques.

Monture azimutale
(pivote autour de l'axe vertical).

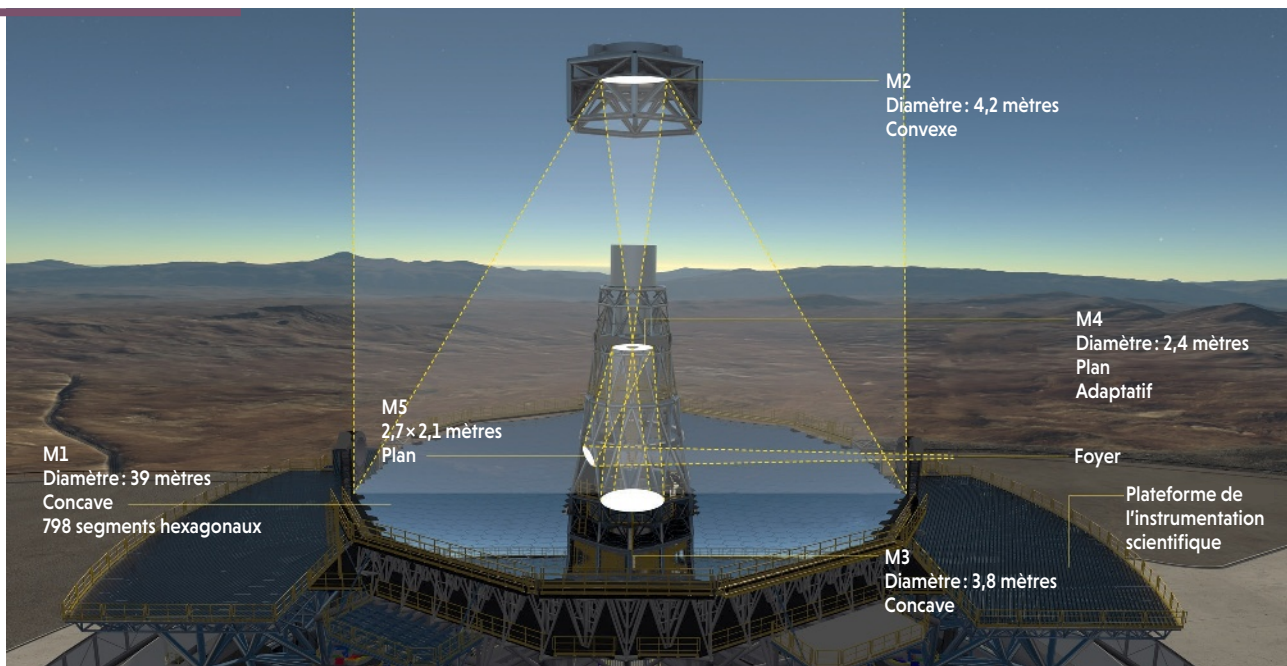
Avec une telle taille de miroir, les coûts et les difficultés techniques explosent. Les plus grands télescopes en service actuellement se divisent en deux groupes selon que leur miroir est constitué d'une seule pièce, comme les quatre télescopes qui composent le *VLT* du mont Paranal, ou qu'il est segmenté, c'est-à-dire composé d'un assemblage de pièces plus petites. C'est le cas des deux télescopes de l'observatoire *Keck*, du *GTC* et ce sera aussi celui de l'*ELT*.

UN MIROIR SEGMENTÉ

La raison de ce choix est simple : à partir d'une certaine taille, il est techniquement impossible de tailler et de polir un miroir d'un seul bloc. La solution est donc de fabriquer plusieurs pièces et de les assembler. Toutefois, pour qu'un miroir segmenté puisse remplir sa

mission scientifique, en particulier en ce qui concerne la qualité de l'image, le véritable défi consiste à disposer et maintenir toutes les parties de façon que l'ensemble se comporte comme un miroir géant d'un seul tenant.

Dans le cas de l'*ELT*, le miroir primaire sera composé de 798 segments hexagonaux, d'environ 1,4 mètre de diamètre entre 2 sommets opposés. Chacun sera équipé de 12 capteurs et 3 actionneurs ainsi que d'autres mécanismes de contrôle de sa position. Le tout fait du miroir primaire le système le plus complexe de l'observatoire. La tolérance maximale de décalage vertical entre deux segments adjacents est de quelques dizaines de nanomètres et les défauts de surface ne peuvent excéder 20 nanomètres, ce qui requiert un procédé de polissage extrêmement long et coûteux de 6 ans. Au-delà ➤

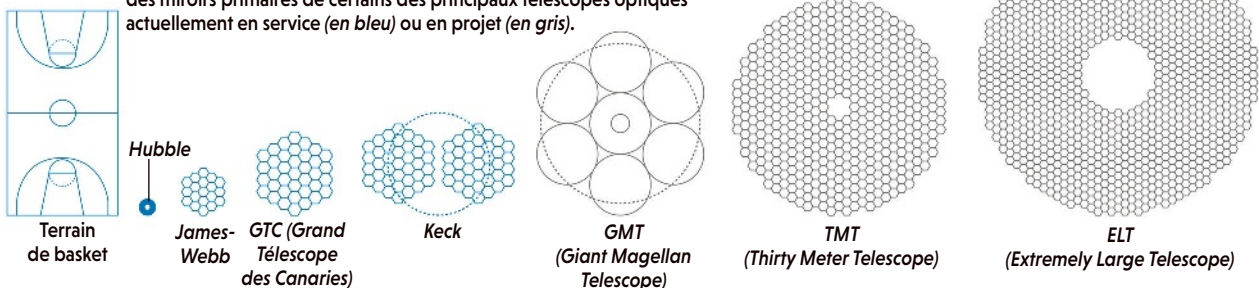


FORMATION DE L'IMAGE

L'*ELT* compte une succession de six miroirs qui guident les rayons lumineux (zones ombrées) jusqu'au foyer où ils forment une image. Ce schéma montre les cinq premiers miroirs (de M1 à M5). Le sixième (M6, non représenté) se trouve sur la plateforme d'instrumentation scientifique. Sa fonction est de diriger la lumière vers l'un des instruments qui y sont installés. Le télescope comprend deux plateformes de ce type, chacune équipée de son propre M6.

UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE TÉLÉSCOPES

L'*ELT* sera le plus grand d'une nouvelle génération de télescopes géants destinés à révolutionner tous les domaines de l'astronomie. Ce schéma compare les tailles des miroirs primaires de certains des principaux télescopes optiques actuellement en service (en bleu) ou en projet (en gris).



LES OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE L'ELT

L'ELT étudiera avec une grande précision tous types d'objets aussi bien proches que lointains. Grâce à une instrumentation de pointe, ses objectifs scientifiques seront nombreux et concerneront aussi bien le Système solaire, l'atmosphère des exoplanètes et les disques protoplanétaires que les galaxies lointaines, les trous noirs ou la première génération d'étoiles de l'Univers.

SYSTÈME SOLAIRE



Saturne, photographiée par la sonde *Cassini* en 2010.

Avec l'avalanche de missions spatiales destinées à étudier les objets du Système solaire *in situ*, on peut penser qu'un télescope situé sur Terre n'a pas grand-chose de nouveau à apporter. Toutefois, étant donné l'abondance et la diversité des corps, leur variabilité dans le temps et l'éloignement de certains d'entre eux, nombreux sont les aspects qui restent à explorer.

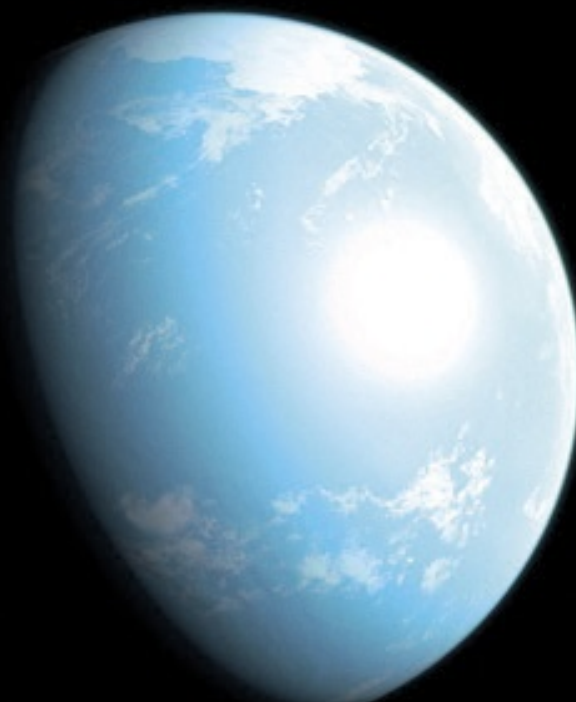
L'étude des corps primordiaux tels que les astéroïdes, les comètes ou les objets transneptuniens révélera de précieuses données sur le passé du Système solaire. Les satellites de certaines planètes sont le siège de phénomènes transitoires que l'ELT suivra en direct et caractérisera. Parmi eux : les nuages, lacs et océans de méthane de Titan (une lune de Saturne), l'activité volcanique d'Io (satellite de Jupiter) ou les geysers et panaches aqueux d'Europe (Jupiter) ou d'Encelade (Saturne) qui sont d'un grand intérêt pour l'astrobiologie.

Par ailleurs, étant donné l'absence de missions spatiales vers Uranus ou Neptune avant au moins 2030, l'ELT étudiera en détail la météorologie, le climat, les vents et l'atmosphère de ces mondes lointains.

EXOPLANÈTES

Plus de 4 000 planètes en orbite autour d'autres étoiles ont été cataloguées depuis la découverte de la première, en 1995. Leur diversité est immense et nous connaissons certaines caractéristiques de leurs orbites ainsi que leurs masses et leurs tailles, ce qui permet parfois d'en déduire s'il s'agit de mondes rocheux, gazeux ou gelés. Cependant, on en sait très peu sur leurs caractéristiques physiques. On a déterminé la présence de certains composés chimiques ou de brumes d'altitude seulement pour certaines des plus grandes exoplanètes. L'ELT accédera aux propriétés physicochimiques des atmosphères de nombreuses exoplanètes. En fait, son objectif le plus ambitieux, et l'une des raisons qui ont motivé sa construction, sera la caractérisation des planètes semblables à la Terre, en particulier celles qui se trouvent dans la « zone habitable » de leur étoile hôte, la région où la présence d'eau liquide à la surface de la planète est possible.

À l'aide de techniques coronographiques (qui masquent la lumière de l'étoile pour mieux discerner celle réfléchie par la planète), comme celles qui seront mises en œuvre par l'instrument *Metis*, l'ELT analysera les atmosphères d'exoplanètes et déterminera leur température à partir de la lumière réfléchie ou de leur rayonnement thermique propre. On pourra aussi rechercher des traces de vapeur d'eau, d'oxygène et d'autres gaz qui sont potentiellement des biomarqueurs, tels le méthane et l'oxyde nitreux, sur des planètes plus petites. La recherche de « signes de vie » sera l'un des principaux objectifs.



Vue d'artiste de l'exoplanète GJ 357 d, distante de 31 années-lumière.

Vue d'artiste du disque protoplanétaire de l'étoile HD 21997, distante de 235 années-lumière.

SYSTÈMES PLANÉTAIRES

La formation des systèmes planétaires constituera une autre voie de recherche pour l'ELT. L'observatoire *Atacama*, a déjà observé en détail la structure de disques protoplanétaires autour d'étoiles jeunes. Grâce à sa haute résolution aussi bien spectrale que spatiale, l'ELT analysera la façon dont la matière se regroupe dans ces disques pour former des planètes, déterminera ses mouvements ainsi que la distribution du gaz et de la poussière. Cela permettra de mieux comprendre comment se forment les systèmes planétaires autour des différents types d'étoiles.



La galaxie UGC1810, située à 300 millions d'années-lumière, photographiée par le télescope spatial *Hubble*.

GALAXIES ET TROUS NOIRS

Un autre grand objectif de l'*ELT* sera de démêler les mystères de la formation et de l'évolution des galaxies. Sa résolution spatiale élevée lui permettra d'étudier le trou noir central de la Voie lactée et celui d'autres galaxies proches. Il mesurera les mouvements des étoiles du centre galactique autour de lui, et déterminera comment croissent ces colosses et comment ils influent sur l'évolution des galaxies.

L'*ELT* étudiera aussi les parties plus extérieures des galaxies.

La spectroscopie en infrarouge proche de l'instrument *Metis* permettra d'analyser des milliers d'étoiles au sein des amas globulaires, des « essaims » stellaires qui gravitent comme des satellites autour des grandes galaxies. On espère aussi pouvoir étudier la structure et l'évolution chimique des galaxies de l'amas de Virgo et de celui de Fornax, situés respectivement à 54 et 62 millions d'années-lumière.

L'UNIVERS LOINTAIN

Par spectroscopie à haute résolution, l'*ELT* analysera la lumière de supernovæ très lointaines, correspondant à des époques auxquelles l'Univers n'avait qu'entre 1 et 6 milliards d'années (l'âge actuel de l'Univers est estimé à environ 13,8 milliards d'années). Le télescope fournira des informations sur les galaxies de ces époques précoces, leur évolution chimique et les mécanismes de formation stellaire qui y opéraient. L'*ELT* devrait pouvoir remonter encore plus loin dans le temps. Capable de détecter des sources très faibles et lointaines, il devrait être en mesure d'observer l'époque où l'Univers avait entre 200 et 500 millions d'années, lorsqu'il s'est empli de la lumière des toutes premières étoiles, que l'hydrogène a été ionisé et que sont apparues les premières protogalaxies. Les meilleurs télescopes actuels ne peuvent qu'à grand-peine détecter les galaxies les plus lumineuses à des époques où l'Univers avait 500 millions d'années.



CL J10001, l'amas de galaxies le plus lointain que l'on connaisse. À cause de la distance qui nous en sépare, cette image le montre tel qu'il était lorsque l'Univers avait 2,7 milliards d'années, soit 20 % de son âge actuel.

L'ACCÉLÉRATION DE L'EXPANSION COSMIQUE

On sait depuis vingt-cinq ans que l'expansion de l'Univers accélère. Ce résultat inattendu vient de l'observation d'un type particulier de supernovæ dont la luminosité intrinsèque est connue et toujours la même, et dont, par conséquent, la distance est donnée directement par la mesure de l'éclat apparent, indépendamment de leur vitesse de fuite due à l'expansion cosmique. Cette découverte, fondée en partie sur des travaux effectués avec les télescopes de l'ESO, a valu en 2011 le prix Nobel à Saul Perlmutter, Adam Riess et Brian Schmidt. L'étude détaillée de ce phénomène est l'un des objectifs principaux de la cosmologie moderne. L'*ELT* mesurera avec une grande précision les vitesses de fuite de nombreuses galaxies lointaines. En comparant les données correspondant à différentes époques de l'histoire de l'Univers, il fournira une mesure directe de l'accélération de l'expansion cosmique.

Quelques-unes des galaxies les plus lointaines et les plus anciennes que l'on connaisse, photographiées par le télescope spatial *Hubble*.

PHYSIQUE FONDAMENTALE

Pour finir, l'*ELT* devrait fournir des pistes pour répondre à certaines questions ouvertes en physique fondamentale. L'une d'elles est de savoir si la constante dite « de structure fine » (paramètre qui caractérise l'intensité de la force électromagnétique entre les particules élémentaires) ou le rapport entre les masses du proton et de l'électron sont restés toujours les mêmes depuis la naissance de l'Univers ou si, au contraire, ils ont varié au cours de l'histoire cosmique. L'analyse du rayonnement des quasars très lointains fournira des mesures de la constante de structure fine avec une précision de 1 partie pour 10 millions et indiquera si cette valeur dépend de la distance de la source, c'est-à-dire de l'âge de l'Univers au moment où la lumière a été émise.



Le quasar 3C273. Sa lumière a mis 2,5 milliards d'années à nous parvenir.

> du miroir primaire, les autres miroirs ont des contraintes de polissage comparables et, bien qu'ils soient d'un seul tenant, leur fabrication reste difficile.

Malgré tout, le plus grand défi technique de l'ELT sera de maintenir les six miroirs dans les bonnes formes et les bonnes positions respectives pour compenser les perturbations, qu'elles soient d'origine externe ou interne. Le problème se pose pour tous les télescopes, mais il devient particulièrement compliqué dans le cas des télescopes géants. Les perturbations extérieures peuvent être induites par la pesanteur, par le vent ou par les changements de température au cours de la nuit. De leur côté, les perturbations internes peuvent provenir des écarts thermiques entre les différentes parties de la machine ou des vibrations de la structure.

COMPENSER LES PERTURBATIONS

Pour apprécier les subtilités et la complexité de ces effets, il faut comprendre comment se meut un télescope. L'engin pointe un objet dans le ciel un peu à la manière d'un canon: ce qu'on nomme la «monture azimutale» pivote autour d'un axe vertical, tandis que la «monture d'altitude» le fait autour d'un axe horizontal. Ces mouvements sont susceptibles d'être exécutés rapidement et s'achèvent en quelques minutes. Cependant, une fois que l'objet est visé, il faut compenser l'effet de la rotation de la Terre pendant toute la durée de l'observation (typiquement de l'ordre de quelques minutes à quelques heures).

La structure est alors soumise à des déformations dues à son propre poids et dont l'intensité dépend de l'orientation du télescope par rapport à la verticale. C'est particulièrement le cas de la monture d'altitude qui, tout en pesant 2000 tonnes, voit son orientation verticale modifiée de façon significative à mesure que le télescope travaille. Toutes ces déformations structurelles déplacent les miroirs par rapport à leurs positions

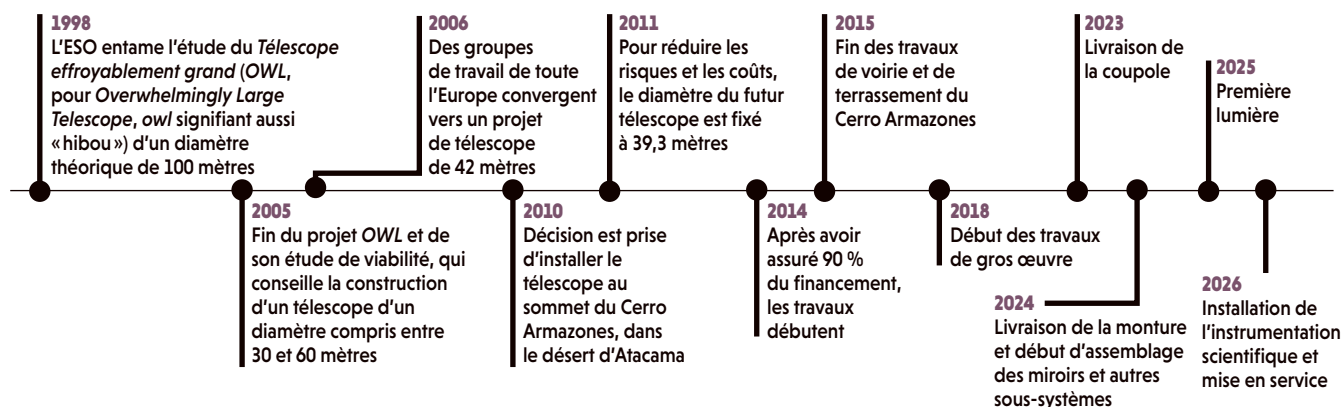
nominales. Il faut y ajouter les déformations que les miroirs eux-mêmes subissent, là encore sous l'effet de leur propre poids. Si on ne les compensait pas, ces deux effets engendreraient des erreurs de pointage et des distorsions de l'image dans le plan focal.

Par ailleurs, les variations de température tout au long de la nuit, de même que les écarts de température entre les différentes parties du télescope, induisent des dilatations et des contractions de la structure et des miroirs, ce qui, tout comme les effets de la pesanteur, engendre des erreurs de pointage et dégrade l'image. Il en va de même des perturbations dues au vent. Ce problème touche la majorité des observatoires, car ils sont généralement installés sur des sites où la qualité de l'atmosphère est excellente, mais où le vent souffle souvent assez fort.

Pour finir, il faut ajouter à tout cela les vibrations provoquées par le fonctionnement même de la structure de support: de nombreux équipements tels que les réfrigérateurs à eau ou les pompes à huile des coussinets hydrostatiques soutenant les axes du télescope, engendrent des vibrations de haute fréquence et, par conséquent, des mouvements des miroirs de faible amplitude mais très rapides.

Fort heureusement, hormis les vibrations internes, toutes les perturbations mentionnées peuvent être ramenées à des niveaux acceptables. Le télescope dispose à cette fin d'actionneurs capables de modifier aussi bien la forme que la position des miroirs. Ces actionneurs sont asservis à une série de caméras qui produisent en permanence des images de certains objets célestes de référence, ce qui permet de les comparer et de compenser les déformations en temps réel. Les vibrations de la structure, en revanche, se succèdent si rapidement qu'elles sont très difficiles à compenser. La bonne stratégie consiste donc à les combattre dès l'origine, à faire en sorte qu'elles n'aient pas lieu ou tout au moins à les amortir à l'aide de systèmes antivibrations.

CHRONOLOGIE DE L'ELT



Le quatrième miroir, déformable, comporte 5300 actionneurs

BIBLIOGRAPHIE

S. Ramsay et al., **The ESO Extremely Large Telescope instrumentation programme**, *Advances in Optical Astronomical Instrumentation 2019*, article 1120303, 2020.

The science case for the European Extremely Large Telescope : The next step in mankind's quest for the universe, ESO, septembre 2010 : www.eso.org/public/products/books/book_0003

The E-ELT construction proposal, ESO, décembre 2011 : www.eso.org/public/products/books/book_0046

Programme de construction de télescopes géants aux États-Unis : www.noao.edu/us-elt-program/overview.php

En plus des perturbations que nous venons de décrire, l'atmosphère ajoute d'autres effets non désirés. Les turbulences et la répartition irrégulière de la température provoquent des modifications locales de l'indice de réfraction : les rayons lumineux provenant d'objets lointains sont alors légèrement déviés, de quoi déformer l'image qui se forme dans le télescope. C'est principalement pour éviter cet effet qu'on met en orbite dans l'espace des télescopes, comme *Hubble* ou le futur télescope *James-Webb* de la Nasa, de l'Esa et de l'Agence spatiale canadienne.

Là encore, cet effet, qui rendrait inutile l'effort de construire un télescope géant, du moins en ce qui concerne le pouvoir de résolution, peut être compensé. La solution se trouve du côté des techniques dites « d'optique adaptative » : il s'agit essentiellement d'utiliser des miroirs dont la surface est déformable de façon à contrebalancer les distorsions dues à l'atmosphère. Bien que ces techniques existent déjà et soient mûres, leur application à un miroir de 39,3 mètres constitue un défi hors de portée. Ainsi, dans l'ELT, c'est le quatrième miroir qui est déformable. Il comporte 5300 actionneurs et mesure 2,4 mètres de diamètre pour seulement 2 millimètres d'épaisseur. Ce miroir est l'un des éléments les plus cruciaux et délicats de l'ELT.

DES LASERS DANS LE CIEL

L'origine de ces techniques d'optique adaptative remonte au milieu du xx^e siècle, mais elles n'ont été appliquées à l'astronomie qu'à partir des années 1990 avec l'augmentation de la puissance de calcul informatique. On les applique désormais aussi en ophtalmologie et, plus récemment, en imagerie cellulaire. Différents observatoires ont développé ces techniques, parmi lesquels l'ESO. L'un des télescopes de 8,2 mètres qui composent le VLT est équipé d'un miroir déformable pour de l'optique adaptative. Toutefois, jusqu'à il y a peu, cette technique n'était utilisable que pour étudier certaines régions précises du ciel : celles qui contenaient une étoile assez brillante pour servir de référence. Cette limitation a été dépassée grâce au développement des « étoiles laser ».

De quoi s'agit-il ? Pour que les techniques d'optique adaptative fonctionnent, il faut en permanence prendre des images d'objets de référence, les analyser et engendrer ainsi les commandes à envoyer aux actionneurs pour déformer les miroirs et corriger l'image. Puisque l'atmosphère évolue très vite, le système de contrôle doit être lui aussi très rapide. Mais pour cela, il faut que les étoiles de référence soient suffisamment brillantes, ce que l'on ne trouve hélas pas dans la plupart des régions du ciel. Pour résoudre le problème, on crée des étoiles artificielles en tirant divers faisceaux laser. Ces derniers excitent la couche de sodium gazeux se trouvant à 80 kilomètres d'altitude dans la mésosphère, ce qui produit des points lumineux dont l'éclat équivaut à celui d'une étoile naturelle.

L'ELT devrait être équipé de huit lasers de ce type afin de produire autant d'étoiles artificielles. Ces lasers de grande puissance ont été développés et brevetés par l'ESO. Avec l'aide de partenaires industriels, l'ESO a optimisé leur production pour les adapter aux besoins spécifiques de l'ELT.

DÉFIS ET RÉCOMPENSES

La construction de l'ELT, bien qu'elle ait son lot de problèmes inhérents à des projets de cette envergure, se déroule jusqu'ici comme prévu. En ce qui concerne les différentes parties du télescope, les principales difficultés se concentrent en ce moment autour du miroir primaire et du quatrième miroir, celui de l'optique adaptative. Du point de vue global, la principale difficulté sera le maintien des miroirs dans les bonnes positions et les bonnes formes à chaque instant. C'est là une exigence essentielle pour obtenir une image au plan focal libre de toute aberration. Sans cela, tout l'intérêt d'avoir un télescope géant sera perdu.

Que nous réserve le plus grand œil de la planète ? Les premières découvertes dépendront dans une large mesure de l'ordre selon lequel les différents instruments, qui ont chacun des qualités spécifiques, arriveront à l'observatoire. Peut-être concerneront-elles les galaxies, les planètes ou les trous noirs. Toutefois, celui qui aurait le plus d'impact, bien que la perspective en soit plus éloignée dans le temps, serait d'obtenir l'image d'une planète semblable à la Terre en orbite autour d'une étoile de type solaire.

L'ELT est une machine extrêmement complexe qui, tout en pesant plus de 3600 tonnes et en étant aussi haute qu'une cathédrale, devra viser des objets stellaires avec une précision de quelques millièmes de degré et fournir des images d'une qualité exceptionnelle à différents instruments scientifiques. Ces derniers sont eux-mêmes des machines gigantesques dont la conception est techniquement très délicate. Le gant est relevé. ■

