

> 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 tourner 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

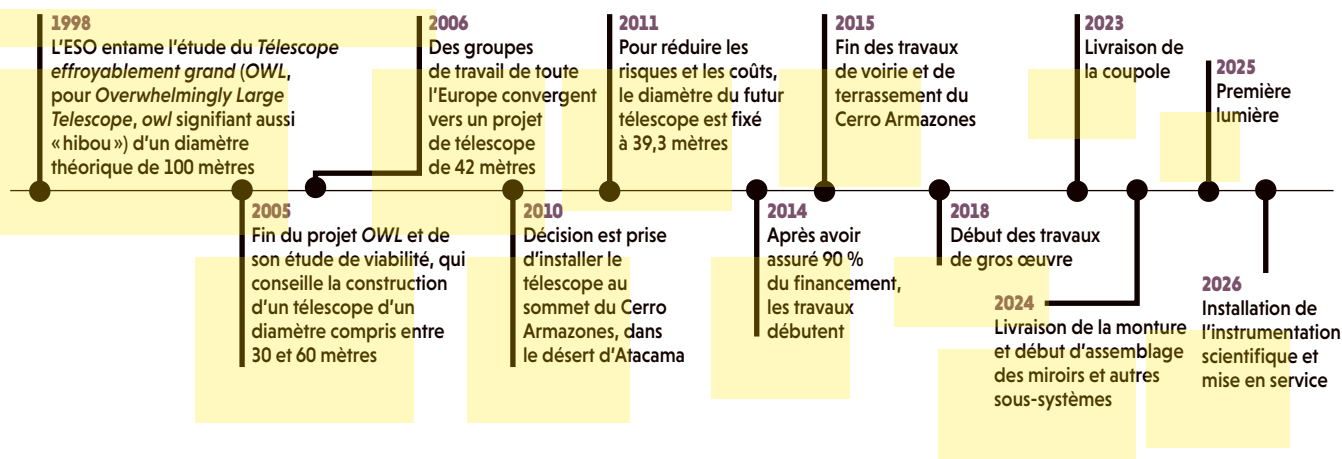
nominales. Il faut y ajouter les déformations que les miroirs eux-mêmes subissent, là encore sous l'effet de leur propre poids. Si on ne les compensait pas, ces deux effets engendreraient des erreurs de pointage et des distorsions de l'image dans le plan focal.

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

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. ■

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