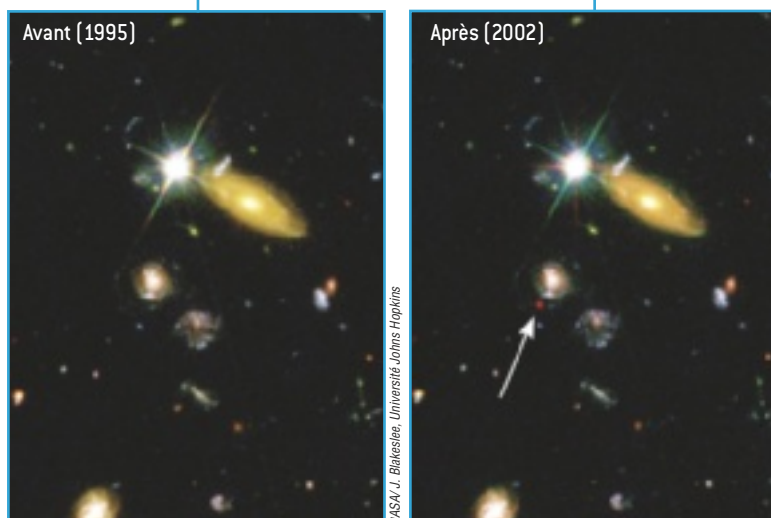


10 L'accélération de l'Univers

En 1998, deux équipes ont fait sensation en annonçant que l'expansion de l'Univers s'accélère. Les astronomes avaient jusque-là considéré qu'elle ralentissait, car les galaxies s'attirent mutuellement par effet de gravitation, ce qui devrait retarder leur éloignement. Le moteur de cette accélération est sans doute le plus grand mystère de la physique actuelle. Selon l'hypothèse la plus répandue, l'Univers contiendrait un constituant non détecté, nommé énergie sombre. Des observations croisées de *Hubble*, des télescopes au sol et le fond diffus cosmologique suggèrent que cette énergie constituerait environ les trois quarts de la densité d'énergie totale de l'Univers.

Cette accélération a commencé il y a environ cinq milliards d'années ; auparavant, l'expansion ralentissait. En 2004, *Hubble* a découvert 16 supernovae distantes qui couvrent cette transition cruciale. Ces observations ont également posé des contraintes plus pertinentes sur la nature de l'énergie sombre. La possibilité la plus simple (mais à certains égards la plus mystérieuse) est qu'il s'agit d'une forme d'énergie contenue dans tout l'espace, y compris dans le vide. Le rôle de *Hubble* dans l'étude de l'énergie sombre est peut-être ce qui pourrait pousser la NASA à garder *Hubble* en fonctionnement. Pour le moment, c'est un instrument indispensable pour la recherche des supernovae qui permettront de comprendre ce qu'est l'énergie sombre.



Une supernova éloignée, découverte en comparant des images à différents instants, a révélé une transition entre une décélération cosmique et une accélération.

Mario LIVIO travaille actuellement à l'Institut scientifique du télescope spatial, à Baltimore.

<http://hubblesite.org>

L'Union des professeurs de physique et chimie (UdPPC) organise à Besançon ses 54^{es} Journées nationales du vendredi 27 au lundi 30 octobre 2006



Le centenaire de l'UdPPC

L'Union des physiciens (UdP, devenue UdPPC) fut créée à Pâques 1906, dans le but de mettre en œuvre et développer le caractère expérimental de l'enseignement des sciences.

Le temps est le thème majeur des conférences plénières, données par :

Claude COHEN-TANNOUDJI (ENS Paris, prix Nobel de physique 1997),
Jean-Marc GAUDIN (Genève),
Michel de LABACHELERIE (Besançon),
Etienne KLEIN (CEA Saclay),
Etienne GUYON (ESPCI),
Gabriel CHARDIN (CEA Saclay),
Daniel SIMON (Lyon),
Jean-Marie VIGOUREUX (Besançon).

Plus de trente ateliers scientifiques, pédagogiques et culturels sont programmés, avec la participation des laboratoires de recherche de l'Université de Franche-Comté.

Des expositions : matériels pédagogiques, ouvrages scientifiques et expériences didactiques seront présentés.

Des visites scientifiques et culturelles permettront de découvrir les richesses et le dynamisme de la Franche-Comté.

Inscriptions et programme détaillé :
<http://besancon.udppc.asso.fr>

Les télescopes géants

Des télescopes dont le miroir atteint 100 mètres de diamètre verront le jour d'ici une quinzaine d'années. Ils permettront notamment d'observer des planètes extrasolaires ressemblant à la Terre.

Roberto Gilmozzi

Monter de nuit sur la plateforme qui abrite les quatre télescopes de huit mètres de diamètre du VLT (pour *Very Large Telescope*, ou Très grand télescope), à l'observatoire européen du mont Paranal, au Chili, est une expérience magique. L'immense ciel étoilé au-dessus de la tête, les reliefs du désert à peine discernables sous l'horizon opalescent, mais aussi les mouvements silencieux et réguliers des télescopes de 430 tonnes aux noms étranges – *Antu*, *Kuyén*, *Melipal* et *Yepun*, soit le Soleil, la Lune, la Croix du Sud et Vénus en langue mapuche –, tout invite à la rêverie.

Le VLT, l'ensemble de télescopes le plus performant du monde, est une entreprise collective qui réunit de nombreuses nations. Comme les autres grands télescopes actuels, tels l'Observatoire *Keck* ou le télescope spatial *Hubble*, le VLT est un fleuron de la technique, issu des efforts conjugués de millions de personnes.

Cependant, le VLT avait à peine été construit que les astronomes ont commencé à se préoccuper de ses successeurs. Comme tous les nouveaux instruments scientifiques, les télescopes de huit à dix mètres de diamètre actuellement en activité ont apporté bien plus que des réponses aux questions pour lesquelles ils ont été conçus. Leurs découvertes ont soulevé de nouvelles questions, plus fondamentales. Étudier les

VLT sans optique adaptative
Diamètre des miroirs : 8,20 mètres
Résolution : 0,4 seconde d'arc
Temps de pose : 620 secondes

L'optique adaptative permet au télescope européen VLT de passer de taches indistinctes à une image plus détaillée que celle du télescope spatial *Hubble*. Cette résolution n'est cependant rien à côté du luxe de détails qu'offrirait le télescope géant OWL (ces simulations sont fondées sur une image prise par le VLT de la région de formation d'étoiles NGC 3603).

Saint-Etienne (France)
European Southern Observatory (ESO)

du futur



Télescope spatial *Hubble*
Diamètre du miroir : 2,40 mètres
Résolution : 0,04 seconde d'arc
Temps de pose : 1 600 secondes

VLT avec optique adaptative
Diamètre des miroirs : 8,20 mètres
Résolution : 0,012 seconde d'arc
Temps de pose : 160 secondes

Projet OWL
Diamètre du miroir : 100 mètres
Résolution : 0,001 seconde d'arc
Temps de pose : 1 seconde

planètes de type terrestre au sein d'autres systèmes stellaires, rechercher des signes de vie, observer les premières galaxies de l'Univers, comprendre la nature de la matière noire et de l'énergie sombre, etc. Tous ces défis appellent une nouvelle génération de télescopes des centaines de fois plus puissants que les instruments actuels. Plusieurs agences spatiales ont fait de tels projets une priorité; pour l'Académie américaine des sciences, cet objectif arrive juste après la mise en service du successeur de *Hubble*, le télescope spatial *James Webb* (ou JWST). Nombre de projets sont à l'étude, notamment le télescope de trente mètres (*Thirty Meter Telescope*, ou TMT) et le télescope *Magellan* de 24 mètres (GMT), ou le télescope OWL (*Overwhelmingly Large Telescope*, ou télescope excessivement grand).

En microélectronique, la loi de Moore prévoit que la densité de transistors par unité de surface double tous les 18 mois. Les télescopes ont suivi une loi similaire: tous les 20 ou 30 ans, une nouvelle génération de télescopes voit le jour, avec des miroirs dont le diamètre a doublé. Il y a ainsi eu en 1917 le télescope *Hooker* du mont Wilson dont le miroir principal fait 2,5 mètres de diamètre, en 1948 le télescope *Hale* du mont Palomar avec cinq mètres, en 1992 les télescopes jumeaux du *Keck*, construits sur le Mauna Kea à Hawaï, avec un diamètre de miroir atteignant dix mètres.

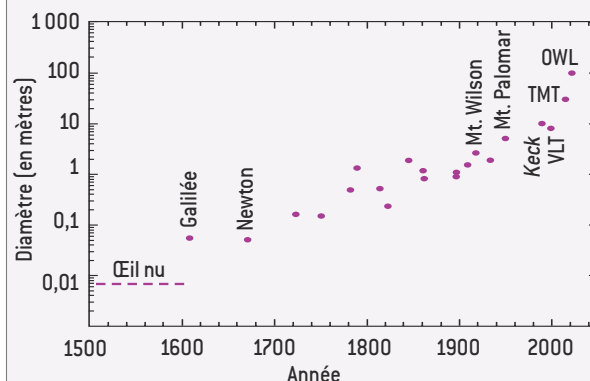
En continuant ainsi, la prochaine génération de télescopes devrait atteindre 20 mètres de diamètre d'ici 2025. Ceux qui proposent un télescope de 100 mètres de diamètre d'ici dix ans sont-ils irréalistes? Un examen des défis à relever pour construire de tels télescopes montre qu'il n'en est rien. Non seulement les besoins sont pressants, mais, dans une large mesure, les techniques nécessaires existent déjà.

Augmenter la surface collectrice

Une des motivations principales pour construire des grands télescopes est que les autres solutions pour améliorer les capacités des instruments arrivent à leurs limites. Dans un télescope, la lumière incidente est réfléchiée par un miroir principal et focalisée par un miroir secondaire en un point où est placé un détecteur (un capteur photographique ou un spectrographe qui décompose la lumière selon les différentes longueurs d'onde pour l'analyser). La taille d'un télescope se réfère au diamètre du miroir primaire. La sensibilité de l'instrument est proportionnelle à la quantité de lumière collectée, c'est-à-dire à la surface du miroir, ou encore au carré de son diamètre. Doubler le diamètre permet par exemple d'observer des corps célestes quatre fois moins lumineux, ou de même luminosité mais deux fois plus éloignés.

Au cours des 50 dernières années, les télescopes ont gagné en sensibilité non seulement en raison de l'augmentation de leur diamètre, mais aussi à cause de l'amélioration des détecteurs. Le télescope du mont Palomar était initialement équipé de plaques photographiques capables d'enregistrer quelques pour cent seulement de la lumière incidente. Les détecteurs électroniques actuels ont une efficacité proche de 100 pour cent. Le gain en sensibilité imputable aux capteurs équivaut à un quintuplement du diamètre du télescope. Les télescopes actuels étant de surcroît deux fois plus grands que ceux de la génération précédente, cela revient à dire qu'ils sont 100 fois plus sensibles. Pour accomplir le

La taille du miroir des télescopes ne cesse d'augmenter et double tous les 20 à 30 ans à peu près. Les télescopes en projet tels OWL ou TMT perpétueront cette tendance.



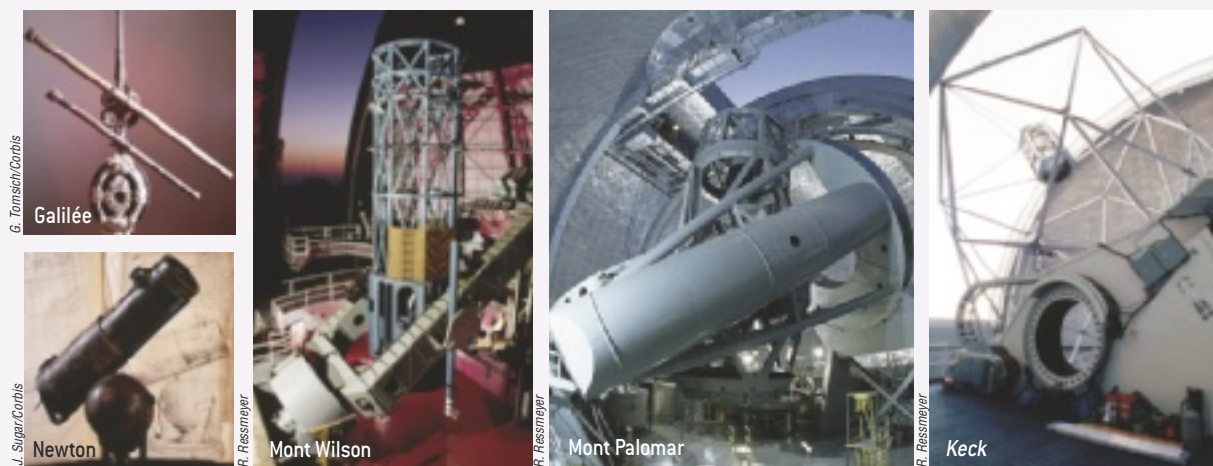
même bond en sensibilité, maintenant que l'efficacité des détecteurs est presque à son maximum, il faut désormais envisager un miroir de 100 mètres de diamètre.

Les partisans des différents projets sont partagés sur la taille envisageable, mais personne ne doute de la nécessité d'augmenter la surface collectrice des prochains télescopes. Jusque récemment, la taille des télescopes était limitée par les capacités techniques en termes de fabrication et de polissage du miroir. Pour obtenir des images les plus nettes possibles, il faut en effet supprimer toutes les imperfections de surface dont l'amplitude est supérieure à une fraction de la longueur d'onde de la lumière recueillie. Cette contrainte est bien plus importante pour les télescopes optiques que pour les radiotélescopes, pourtant beaucoup plus grands, car la longueur d'onde de la lumière visible est plus courte que celle des ondes radio.

Le télescope du mont Palomar était équipé d'un miroir paraboloidal – vu en coupe, c'est une portion de parabole – de cinq mètres de diamètre, poli avec une précision de 50 nanomètres (soit l'équivalent de bosses d'au plus un centimètre sur une surface grande comme la France). Son polissage – avec finition à la main – a duré 11 ans, pendant lesquels sa forme était mesurée tous les deux jours (avec cependant une interruption durant la Seconde Guerre mondiale).

Le polissage des miroirs est aujourd'hui piloté par ordinateur, ce qui accélère le processus. Chacun des quatre miroirs de 8,2 mètres du VLT a été poli en moins d'un an, et mesuré quasiment en continu. La qualité de leur surface égale, voire dépasse, celle de *Hale*, malgré leur forme plus complexe – un hyperboloïde, qui assure la meilleure focalisation. Le polissage n'est donc plus le principal obstacle.

La fabrication du verre lui-même pose un problème plus sérieux. Pour construire des pièces de verre de huit mètres de diamètre, les constructeurs ont dû mettre sur pied des ateliers spéciaux et tâtonner; ils ont cassé plusieurs miroirs avant de réussir. Les procédés d'aujourd'hui ne permettraient pas de fabriquer des miroirs ne serait-ce que deux fois plus grands. Heureusement, l'astronome italien Guido Horn D'Arzturo proposa la solution dès 1932: construire un miroir en plusieurs morceaux. Les miroirs des télescopes jumeaux du *Keck*, par exemple, sont formés de 36 hexagones courbés, mesurant



1,80 mètre de côté chacun. Chaque segment est un morceau d'hyperboloïde dont la forme précise dépend de sa place dans la mosaïque. La forme hexagonale permet de les agencer pour constituer une surface globale hyperboloïde. En principe, une telle architecture peut être transposée à n'importe quelle échelle. Seules contraintes : aligner les morceaux avec une précision inférieure à une fraction de la longueur d'onde utilisée et maintenir la cohésion de la structure en dépit du vent et des contraintes mécaniques.

Comme le *Keck*, *OWL* et le *TMT* auraient des mosaïques de miroirs hexagonaux, mais les concepteurs du *GMT* ont choisi une voie différente. Afin de réduire les inconvénients de la segmentation, ils ont prévu des segments moins nombreux mais plus grands. Leur télescope comporterait une mosaïque de sept miroirs circulaires de 8,4 mètres de diamètre (le premier d'entre eux est déjà en phase de fabrication, pour valider le principe). Cependant, il sera difficile d'étendre cette idée aux tailles supérieures.

Des exoplanètes à débusquer

La sensibilité lumineuse n'est que l'une des caractéristiques d'un télescope. Un autre point clef est la résolution, l'aptitude à discerner de petits détails. En principe, plus un télescope est grand, moins son image est dégradée par la diffraction des ondes lumineuses sur les bords du miroir, phénomène qui rend floues les images de sources ponctuelles. Une tache brillante indiquée par un petit télescope peut ainsi, vue à l'aide d'un instrument plus grand, se révéler être un amas d'étoiles.

En pratique, cependant, la distorsion du front d'onde lumineux par la turbulence atmosphérique est un obstacle majeur pour les télescopes optiques au sol. Même dans les sites astronomiques les plus purs, la turbulence de l'air brouille l'image de tout objet céleste plus petit que 0,3 seconde d'arc. Si l'on observe l'étoile géante Bételgeuse, qui a un diamètre de 0,05 seconde d'arc, à travers le télescope de cinq mètres du mont Palomar, on verra un point rouge plus brillant mais pas plus ponctuel qu'avec un télescope de 20 centimètres de diamètre (et 300 000 fois moins cher).

Les télescopes spatiaux ont le problème inverse. Ils produisent des images d'une netteté spectaculaire, mais, faute

de miroirs suffisamment grands, manquent de sensibilité pour observer les objets les moins lumineux. Pour que le télescope spatial *Hubble* rentre dans la soute de la Navette spatiale, le diamètre de son miroir a été limité à 2,4 mètres, et même le *JWST* n'aura qu'un miroir de 6,5 mètres de diamètre. Aussi l'analyse spectroscopique des astres découverts par les télescopes spatiaux doit-elle être conduite au sol.

Ce compromis entre sensibilité et résolution n'est pas acceptable pour la nouvelle génération de télescopes, dont les objectifs scientifiques nécessitent les deux qualités à la fois. Un télescope de 100 mètres de diamètre détecterait des astres 1 000 fois moins lumineux que tous ceux découverts jusqu'à présent. Là où les télescopes actuels ne voient qu'un ciel noir, leurs successeurs verraient une foule d'objets faibles. Sans une haute résolution angulaire, les images d'objets voisins se confondraient.

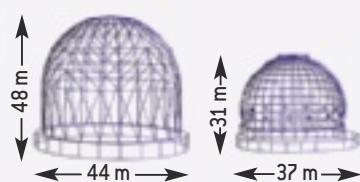
La conjonction d'une résolution élevée et d'une grande sensibilité est aussi nécessaire pour étudier des exoplanètes de type terrestre. Pour détecter une telle planète, au moins un milliard de fois moins lumineuse que son étoile hôte, les astronomes doivent occulter l'étoile avec un petit disque nommé coronographe. Mais si le disque est trop grand, il cache aussi la planète. Une résolution supérieure signifie que les astronomes peuvent se contenter d'un disque plus petit et étendre ainsi la portée de la chasse aux planètes. Pour chercher dans notre voisinage galactique des planètes sur des orbites de type terrestre, un télescope devrait avoir une taille minimale de 80 mètres. Il pourrait passer au crible une région comprenant environ 400 étoiles de type solaire et pourrait recueillir le spectre d'une quarantaine de planètes similaires à la Terre. Un instrument de 30 mètres ne pourrait scruter que les quelques dizaines de systèmes les plus proches, et devrait collecter de la lumière pendant plusieurs semaines pour analyser le spectre d'une éventuelle planète tellurique.

Pour que les télescopes futurs aient une résolution élevée, il faudra surmonter grâce à l'optique adaptative les distorsions introduites par la turbulence atmosphérique. Le principe est de suivre une étoile de référence (qui peut être une « étoile » artificielle créée en envoyant un faisceau laser se réfléchir dans la haute atmosphère) et d'ajuster en temps réel la forme du miroir, de façon à corriger les distorsions

Le projet OWL prévoit un télescope dont le miroir aurait un diamètre de 100 mètres. Il serait ainsi dix fois plus gros que n'importe quel instrument optique jamais construit. Un certain nombre d'innovations techniques limiteraient son coût à moins d'un milliard d'euros, c'est-à-dire un coût inférieur à celui du télescope spatial *Hubble*.

TÉLÉSCOPES ACTUELS

DÔMES



PALOMAR

KECK

MIROIRS PRIMAIRES

5 mètres d'un seul tenant

10 mètres en 36 segments (de 1,80 mètre de diamètre et 7,5 centimètres d'épaisseur)

PALOMAR

KECK

MIROIR PRIMAIRE

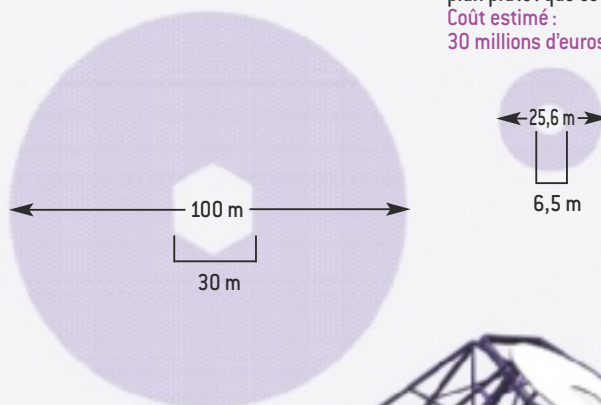
Le miroir primaire, qui collecte la lumière, est constitué de 3 048 segments hexagonaux de 1,60 mètre de diamètre et 15 centimètres d'épaisseur. Afin de réduire les coûts, ces miroirs élémentaires décrivent une portion de surface sphérique (et non parabolique ou hyperbolique), de sorte que leur courbure est constante.

Coût estimé : 290 millions d'euros.

MIROIR SECONDAIRE

Le miroir secondaire, qui renvoie la lumière vers le correcteur, est une mosaïque de 216 segments. Pour alléger les contraintes mécaniques, ce miroir est plan plutôt que courbe.

Coût estimé : 30 millions d'euros.



220 mètres d'envergure
95 mètres de hauteur

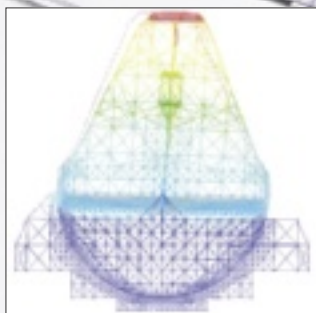
DÔME

Un dôme pivotant classique, mais de 100 mètres de hauteur, ferait exploser le budget. C'est pourquoi le télescope OWL opérera en plein air, et un simple chapiteau sur rails le recouvrira durant le jour et en cas de mauvais temps.

Coût estimé : 70 à 150 millions d'euros.

Miroir primaire

Bâtiment de contrôle



STRUCTURE

L'ossature du télescope se déformera symétriquement lorsqu'il sera incliné, de façon à maintenir l'alignement des miroirs. Les simulations montrent que le déplacement horizontal variera de zéro (en bleu) à 0,6 millimètre (en rouge). La structure occultera en partie le miroir, mais elle ne bloquera en fait qu'environ trois pour cent de la lumière.

Coût estimé : 185 millions d'euros.



MÉCANISME D'ENTRAÎNEMENT

Le télescope OWL pèsera près de 15 000 tonnes, ce qui est trop pour des montures classiques. Au lieu de cela, il sera posé sur 300 systèmes d'entraînement par friction (des boggies) roulant sur des pistes circulaires.

Coût estimé : 30 millions d'euros.

OWL, un géant de 100 mètres

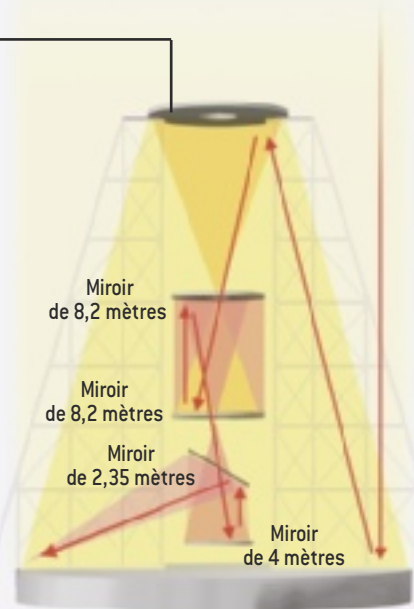
OPTIQUE ACTIVE

Chaque miroir élémentaire est muni de détecteurs et de trois vérins qui contrôlent son orientation.



Chaque segment :
1,6 mètre d'envergure
15 centimètres d'épaisseur

Miroir secondaire



CORRECTEUR OPTIQUE

Les quatre miroirs du correcteur, placés entre le miroir secondaire et les détecteurs, supprimeront les déformations induites par la forme inhabituelle des miroirs primaires et secondaires. Deux de ces miroirs peuvent aussi corriger les distorsions atmosphériques grâce à un système d'optique adaptative.

Coût estimé : 55 millions d'euros pour les miroirs, 100 millions d'euros pour l'optique adaptative.

D. Fédry

de l'image de cette cible et à garder une image toujours nette. Le miroir mobile peut être le miroir secondaire ou un autre miroir plus petit interposé entre le miroir secondaire et les détecteurs. Une série de petits pistons, ou actuators, appuient sur l'arrière du miroir pour ajuster précisément sa forme.

Ce système permet aux télescopes d'approcher la résolution théorique maximale, limitée uniquement par la diffraction, comme si l'atmosphère n'existait pas. Avec l'optique adaptative, un télescope de 100 mètres distinguerait, dans les longueurs d'onde du visible, des détails de 0,001 seconde d'arc, 40 fois plus fins que ceux discernés par le télescope *Hubble*. À travers un tel télescope, Bételgeuse n'apparaîtrait pas comme un simple point lumineux, mais comme une image de 3000 pixels avec un niveau de détail équivalent à celui avec lequel on voit aujourd'hui les planètes proches de la nôtre.

L'optique adaptative est déjà utilisée pour de nombreux grands télescopes, mais la transposer à plus grande échelle n'est pas une mince affaire : pour un télescope de 100 mètres, un système d'optique adaptative devrait être composé de plus de 100 000 actuators, contre 1 000 au plus pour les systèmes actuels. Le système de contrôle devra adapter la forme du miroir plusieurs centaines de fois par seconde, ce dont les processeurs actuels sont incapables.

Les concepteurs adoptent une approche par étapes, en construisant d'abord des systèmes qui opèrent dans l'infrarouge. L'effet de la turbulence étant moins grave pour les grandes longueurs d'onde, un dispositif d'optique adaptative nécessiterait moins d'actuators. Une technique très prometteuse est l'optique adaptative multiconjuguée, dont le VLT est en train de déployer une version prototype ; elle corrige la turbulence sur un grand champ et non seulement dans une petite région centrée sur l'étoile de référence.

De l'optique... et de la mécanique !

L'interférométrie est un autre moyen d'améliorer la résolution. Elle consiste à combiner la lumière recueillie par plusieurs télescopes, les interférences résultantes permettant de reconstruire l'image d'origine avec une résolution encore meilleure que celle d'éventuels télescopes géants. Les quatre télescopes du VLT, distants de 130 mètres les uns des autres, peuvent fonctionner de concert en interférométrie ; ils offrent alors la même résolution qu'un télescope de 130 mètres de diamètre. L'interférométrie a cependant ses limitations. Son champ de vision est très étroit et, en raison de la complexité des systèmes optiques, seuls quelques pour cent de la lumière recueillie sont utilisables, contre 50 pour cent ou plus pour un télescope usuel. De toute façon, la surface collectrice totale n'est que la somme de celles des miroirs mis en jeu, bien inférieure à celle d'un miroir dont le diamètre correspondrait à leur écartement. Ainsi, comme les télescopes spatiaux, l'interférométrie favorise la résolution au détriment de la sensibilité ; elle ne saurait donc se substituer à un télescope géant au sol.

La conception d'un télescope géant pose de nombreux problèmes mécaniques. Le poids d'un animal augmente comme le cube de sa taille, tandis que la résistance de son squelette ne croît que comme le carré de la taille. Proportionnellement à sa taille, un éléphant a donc besoin de jambes beaucoup plus larges qu'une souris. C'est aussi valable

pour les télescopes. La structure du télescope doit être suffisamment rigide pour conserver l'alignement précis des miroirs et pour résister aux vibrations provoquées par le vent, les moteurs ou autre. En général, les télescopes courts et trapus sont plus rigides que les instruments longs et fins, mais leur longueur focale est plus courte – en d'autres termes, les rayons lumineux doivent être plus fortement déviés pour être focalisés – si bien que les imperfections du miroir et les défauts d'alignement se font plus cruellement sentir.

Aussi un équilibre doit-il être trouvé entre exigences mécaniques et exigences optiques. Le VLT vibre un peu sous l'effet du vent, mais on annule l'effet de ces vibrations en imposant à son miroir secondaire un mouvement dans la direction opposée, à une fréquence allant jusqu'à 70 hertz. Il devrait en être de même pour le télescope OWL.

Autre problème : quand le télescope suit le mouvement des étoiles dans le ciel, la répartition de son poids varie, ce qui peut induire une torsion de la structure et un désalignement des miroirs. La plupart des grands télescopes actuels sont construits selon une structure dite en squelette conçue par Mark Serrurier dans les années 1930 pour le télescope du mont Palomar. Les miroirs y sont tenus par un châssis ouvert constitué de quatre armatures triangulaires. Quand on incline le tout, le châssis se déforme et les miroirs se décalent latéralement, mais de la même façon pour tous, de sorte que leur alignement est à peu près conservé.

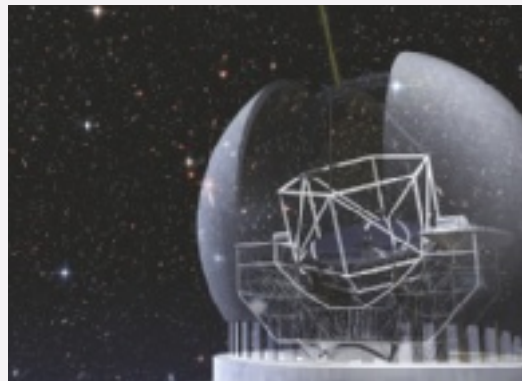
Le projet OWL reprend une approche similaire, mais présente l'avantage d'être construit à partir de quelques composants de base standardisés. La structure totale de OWL pèserait entre 10 000 et 15 000 tonnes – l'équivalent de la tour Eiffel – en fonction du choix des matériaux du miroir. Cela peut sembler excessif, mais OWL serait proportionnellement bien plus léger que les télescopes actuels : grand comme OWL, le VLT pèserait 500 000 tonnes ! Déplacer plus de 10 000 tonnes avec précision constitue cependant un défi. Les options envisagées incluent des chariots munis de systèmes d'entraînement par frottement, de minces couches d'huile sur lesquelles le télescope flotterait (c'est le cas pour le VLT) ou la lévitation magnétique.

Le coût, seul réel problème

Techniquement, les astronomes ne sont donc pas fous lorsqu'ils envisagent la construction de télescopes de 100 mètres de diamètre. Alors que les gains en taille passés ont été autant de sauts vers l'inconnu, la conception des télescopes futurs peut s'appuyer sur des techniques et des connaissances existantes.

Le seul réel problème est le coût d'un tel projet. Si l'on suit l'évolution historique, le prix d'un télescope est proportionnel au diamètre du miroir primaire élevé à la puissance 2,6. Les télescopes du VLT ayant coûté près de 100 millions d'euros chacun, un télescope de 20 mètres devrait alors coûter près de un milliard d'euros. Un télescope de 100 mètres de diamètre coûterait la somme faramineuse de 60 milliards d'euros ! Tant que cette loi sera vérifiée, les astronomes devront se contenter de construire une multitude de petits télescopes pour atteindre une surface collectrice équivalente. Le coût croîtrait alors comme le carré du diamètre souhaité. Pour moins d'un milliard d'euros, on pourrait construire dix

TÉLESCOPE DE TRENTE MÈTRES (TMT)



Diamètre : 30 mètres

Coût estimé : 580 millions d'euros

Conception : Miroir primaire de forme hyperboloïdale et segmenté

Site Internet : <http://www.tmt.org>

télescopes de 8,2 mètres de diamètre, leur surface collectrice totale étant équivalente à un unique télescope de 26 mètres de diamètre. Malheureusement, comme nous l'avons vu, l'équivalence en taille ne signifie pas équivalence en performance. Utilisé comme des télescopes ordinaires, ce réseau de télescopes aurait la sensibilité d'un instrument de 26 mètres, mais le pouvoir de résolution d'un miroir de 8,2 mètres. Utilisé comme interféromètre, il offrirait une résolution excellente, mais une sensibilité bien moindre.

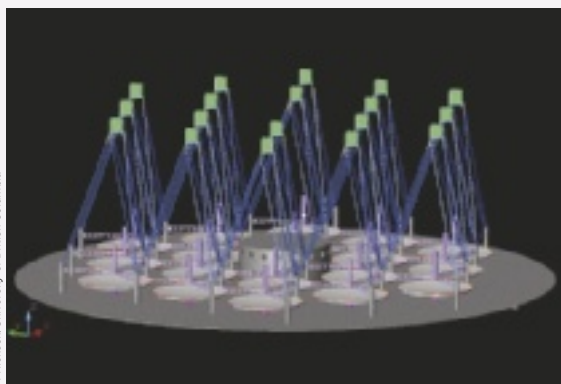
Heureusement, les ingénieurs comptent contourner la loi liée au coût en produisant les composants en série. Pour réaliser le miroir primaire de OWL, nous avons choisi d'assembler des miroirs de forme sphérique et tous identiques, au lieu de miroirs hyperboloïdaux classiques qui nécessitent de fabriquer chaque pièce sur mesure, en fonction de sa position dans le miroir final. On pourrait réaliser les 3048 miroirs élémentaires à la chaîne, au rythme d'un tous les deux jours. Pour compenser la distorsion de la lumière due à la sphéricité des miroirs, le télescope devrait être équipé d'un correcteur, similaire à celui qui a réparé la myopie de *Hubble*. Même ainsi, le système serait moins coûteux.

La forme du miroir secondaire est un autre choix non usuel. Pour simplifier les contraintes mécaniques, nous avons choisi une forme plate en lieu et place de l'hyperboloïde habituel, de sorte qu'une précision de quelques millimètres dans l'alignement suffirait, plutôt que quelques micromètres. L'inconvénient est que le miroir doit alors être énorme (25 mètres de côté). Les économies d'échelle devraient cependant largement compenser la complexité supplémentaire.

L'un des principaux éléments du coût d'un télescope est le dôme qui le protège. Le dôme du télescope du mont Palomar, avec 48 mètres de hauteur, est plus vaste que celui de la basilique Saint-Pierre de Rome. Cette taille est notamment imposée par la monture qui soutient le télescope : elle est inclinée pour pointer vers l'étoile polaire, de sorte que l'instrument peut suivre une étoile simplement en tournant autour de son axe. Ce type de monture est dit équatorial. Les télescopes modernes ont une monture plus

Les autres projets de télescopes géants

RÉSEAU DE MIROIRS LIQUIDES DE GRANDE OUVERTURE (LAMA)



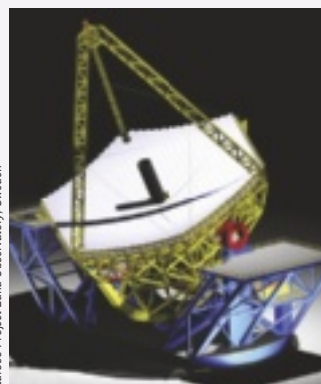
Équivalent à 42 mètres pour la sensibilité,
à 54 mètres pour la résolution
40 millions d'euros
18 miroirs paraboliques de 10 mètres de diamètre
en mercure liquide, pointant à la verticale
<http://www.astro.ubc.ca/LMT/lama/>

TÉLESCOPE GÉANT MAGELLAN (GMT)



Équivalent à 21,40 mètres en surface,
à 24,5 mètres pour la résolution
400 millions d'euros
Sept miroirs hyperboloïdaux
de 8,4 mètres sur une même monture
<http://www.gmto.org>

EURO50



50 mètres
580 millions d'euros
Miroir primaire ellipsoïdal segmenté
<http://www.astro.lu.se/fftorben/euro50>

compacte, dite alt-azimutale (le terme se réfère à un mouvement continu dans deux dimensions plutôt qu'une rotation autour d'un axe). Le contrôle en est plus compliqué, mais a été rendu possible par l'informatique. En conséquence, les dômes modernes sont plus petits – celui du *Keck* fait par exemple 31 mètres de hauteur.

Cependant, même avec une monture alt-azimutale, le dôme d'un télescope de 100 mètres de diamètre serait gigantesque et très onéreux. En outre, des simulations numériques suggèrent qu'une structure aussi monumentale créerait elle-même de la turbulence atmosphérique. Le TMT et le GMT auraient ainsi un dôme, mais OWL serait simplement doté d'un hangar amovible pour être abrité durant la journée ou en cas de mauvais temps, et opérerait à l'air libre le reste du temps. OWL supporterait des vents modérés (jusqu'à 15 mètres par seconde).

L'avenir de l'astronomie optique

Le coût final d'un télescope de 100 mètres de diamètre tel que OWL serait d'environ un milliard d'euros. Le TMT devrait quant à lui coûter environ 580 millions d'euros, et le GMT 330 millions d'euros. Ces coûts restent inférieurs à ceux de la plupart des expériences spatiales, mais représentent néanmoins une somme considérable, qui nécessitera probablement une collaboration internationale.

La dernière décennie a été un âge d'or pour l'astronomie, mais nous attendons encore plus de découvertes d'ici 2015. Les nouveaux détecteurs et l'optique adaptative étendront les capacités des télescopes actuels de huit à dix mètres. L'interférométrie, de nos jours technique expérimentale, deviendra routinière et permettra d'atteindre des résolutions supérieures à la milliseconde d'arc. Le JWST, destiné en particulier aux observations en infrarouge, devrait être lancé en 2013. La mise en service du Grand réseau millimétrique de l'Atacama (ALMA), avec ses 50 antennes de 12 mètres, jettera un pont entre l'astronomie infrarouge et radio dès 2011. Les radioastronomes auront peut-être commencé à construire

le réseau d'antennes SKA (pour *Square Kilometer Array*, ou réseau de un kilomètre carré) pour détecter les ondes radio de basse fréquence, un domaine peu exploré du spectre.

Les astronomes ont-ils vraiment besoin de télescopes géants dans le domaine optique ? Assurément oui, notamment pour étudier les planètes extrasolaires ou les constituants des étoiles et des galaxies. Les télescopes au sol offriront une résolution et une sensibilité plus élevées en lumière visible et infrarouge que les observatoires spatiaux – lesquels se spécialiseront dans les rayonnements X, ultraviolet et infrarouge moyen, auxquels l'atmosphère terrestre est opaque.

Il ne sera pas chose facile pour les astronomes de trancher entre les projets OWL, TMT et GMT. Chacun a ses avantages et ses inconvénients. Un comité international a récemment jugé que le projet OWL était faisable, mais risqué du point de vue financier et technique. Nous élaborons actuellement un projet de plus petite taille, et une décision est attendue avant la fin de l'année.

Au fil des siècles, les télescopes sont passés d'objets tenant sur une table de chevet à des instruments aussi grands qu'un immeuble. Il nous est désormais possible de construire des instruments capables de découvrir les premières étoiles de l'Univers et des jumelles extrasolaires de la Terre. Quand le ferons-nous ? La question reste ouverte.

Roberto GILMOZZI est l'un des principaux responsables du projet de télescope géant OWL. Il a dirigé de 1999 à 2005 l'observatoire européen VLT, au Chili.

Exploring the cosmic frontier: astrophysical instruments for the 21st century, ESO Astrophysics Symposia, Springer-Verlag, sous presse. www.mpifr-bonn.mpg.de/berlin04/

A. L. ARDEBERG et T. E. ANDERSEN (éd.), *Proceedings of second Backskog workshop on extremely large telescopes*, in *Proceedings of the SPIE*, vol. 5382, juillet 2004.

R. GILMOZZI et P. DIERICKX, *OWL concept study*, in *ESO Messenger*, n° 100, pp. 1-10, juin 2000. En ligne : www.eso.org/projects/owl/publications/2000_05_Messenger/htm

Site du projet OWL : www.eso.org/projects/owl/

Le verre dans l'Empire

Le verre fut d'abord une matière précieuse que l'on importait d'Orient, puis l'invention du soufflage en fit un matériau courant.

Véronique Arveiller

