

# LES GRANDS INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES PROFESSIONNELS TERRESTRES



*JP. Maratrey - Février 2007 – MàJ octobre 2019*

## Sommaire :

Le choix du site .....	3
Un peu d'histoire .....	3
Les plus grands télescopes terrestres du monde .....	7
Le miroir alvéolé .....	8
Le miroir segmenté .....	9
Le miroir mince .....	9
L'Observatoire d'Hawaii .....	10
Les Keck .....	10
Le Subaru .....	11
Le Gemini Nord .....	12
Le CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope) .....	13
Les observatoires des Andes .....	14
Observatoire de La Silla .....	14
Observatoire de Las Campanas .....	16
L'observatoire du Cerro Paranal .....	17
L'observatoire du Cerro Pachòn .....	20
L'observatoire d'Afrique du Sud .....	21
Observatoire de l'Institut d'Astrophysique des Canaries .....	22
Le GTC (Gran Telescopio Canarias) .....	22
Observatoire International du Mont Graham .....	23
Le LBT (Large Binocular Telescope) .....	23
L'Observatoire Anglo-Australien (Siding Spring) .....	24
L'AAT (Anglo-Australien Telescope) .....	24
L'observatoire du LZT (Large Zenith telescope) .....	25
Les grands projets .....	26

Le sujet de cet exposé est de brosse le paysage des plus gros télescopes optiques professionnels terrestres en service aujourd'hui. Par optique, il faut comprendre ici ceux qui observent dans le visible et l'Infrarouge proche. La radioastronomie et les instruments UV, X ou gamma ne sont pas compris.

## **Le choix du site**

Un bon site professionnel doit permettre des observations de qualité le plus souvent possible. Au vu du prix de ces télescopes et des budgets des agences qui les gèrent, le temps consacré à l'observation est précieux. De plus, la qualité de ces observations dépend, outre de la qualité du télescope et de ses instruments, de la qualité du site.

Un bon observatoire doit donc répondre à ces critères :

- Couverture nuageuse la plus réduite possible.
- Haute transparence du ciel. En particulier l'humidité relative doit être très basse, l'eau absorbant le rayonnement infrarouge et, dans une moindre mesure, visible.
- Turbulence : réduite évidemment, pour améliorer la résolution des observations.
- Pollution lumineuse : loin des villes.

Seuls quelques endroits sur terre répondent à ces exigences, comme l'île d'Hawaii ou la Cordillère des Andes. En tous cas en altitude.

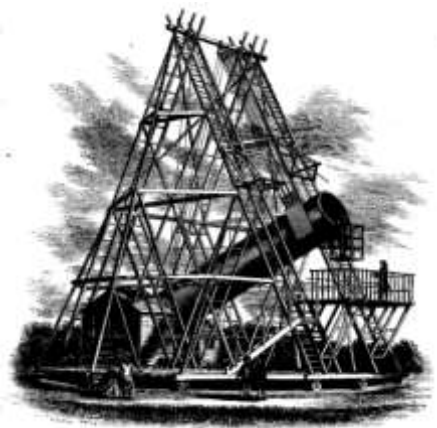
On pourrait penser que les pôles ou des déserts comme le Sahara ou le désert de Gobi sont de bons sites. Les conditions climatiques (trop froid, trop chaud, tempêtes de sable ou de glace...), la stabilité du sol sont des arguments contre, bien qu'un observatoire en Antarctique soit à l'étude.

Les sites existants comme Hawaii ou les Andes ont un défaut : les tremblements de terre. Les observatoires modernes sont construits en respectant les normes antisismiques.

## **Un peu d'histoire**

L'histoire des télescopes professionnels est une course au diamètre. En effet, un gros diamètre a l'avantage d'une part de recueillir plus de lumière, et possède d'autre part une meilleure résolution. Les arguments comme la taille ou le poids de l'instrument, sa complexité (et donc son prix), passent au second plan, sans être négligeables.

Le premier à l'avoir compris est William Herschel (1738-1822). Il a passé sa vie, avec sa sœur Caroline, à construire des télescopes de plus en plus grands, avec en point d'orgue ce gigantesque (pour l'époque) télescope de 1,2 m de diamètre pour 12 m de focale, construit en 1789.



Un siècle plus tard, les lunettes régnaient en maîtres sur l'univers professionnel. L'inconvénient d'une lunette est que la lumière traverse des dioptrés air-verre, et génère des aberrations chromatiques. Corriger ce défaut exige plusieurs lentilles, augmentant parallèlement le poids et les coûts des instruments de grand diamètre. L'objectif du plus grand atteignit 1,02 m.

Le tableau suivant donne un aperçu des principales grandes lunettes de cette époque. Pour éviter, ou du moins limiter l'aberration chromatique, les rapports F/D sont importants ( $> 15$ ).

Observatoire	Diamètre de l'objectif	Focale	Mise en service	Rapport F/D
Observatoire naval (USA)	66 cm	9,9 m	1873	15,0
Observatoire de Vienne (Autriche)	69 cm	10,5 m	1878	15,2
Observatoire Mc Cornick (USA)	67 cm	9,9 m	1883	14,8
Observatoire de la côte d'azur (France)	76 cm	17,9 m	1887	23,5
Observatoire Lick (USA)	91 cm	17,6 m	1888	19,3
Observatoire de Meudon (France)	83 cm	16,2 m	1891	19,5
Observatoire de Greenwich (GB)	71 cm	8,5 m	1894	12,0
Observatoire de Berlin (Allemagne)	68 cm	21 m	1896	30,9
Observatoire de Greenwich (GB)	66 cm	6,8 m	1897	10,3
Observatoire de Yerkes (USA)	102 cm	19,4 m	1897	19,0
Observatoire de Potsdam (Allemagne)	80 cm	12 m	1899	15,0
Observatoire Allegheny (USA)	76 cm	14,1 m	1914	18,5
Observatoire de Johannesbourg (Afrique du sud)	67 cm	10,9 m	1925	16,3

A noter que la grande lunette de Meudon est restée la plus grande lunette d'Europe, surclassée (en diamètre) par celle de Lick, puis celle de Yerkes.

La limite en taille fut vite atteinte, et la génération suivante adopta le miroir en verre plein, ce qui permit de fabriquer des instruments de 6 m de diamètre.

Pour avoir une forme stable et non déformable, un miroir de télescope en verre plein doit avoir un rapport diamètre/épaisseur égal ou supérieur à 6.



*Grande lunette de Meudon (France)*

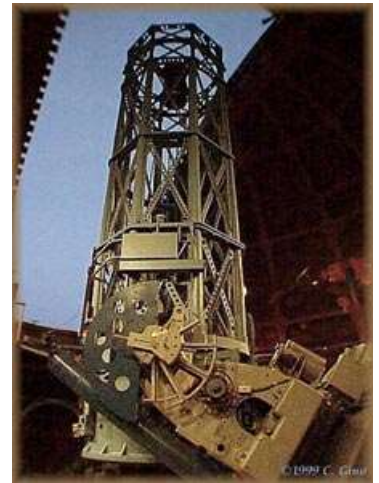
Le précurseur des instruments à miroirs est sans doute l'observatoire du Mont Wilson, près de Los Angeles (USA). Situé à 1 742 m d'altitude, il fut fondé en 1904 par George Ellery Hale.



*Mont Wilson (USA)*

Un premier télescope – télescope Hale - de 60" (152 cm) y vit sa première lumière en 1908. C'était le plus gros diamètre de l'époque. Le miroir, en provenance de Saint-Gobain en France, avait 191 mm d'épaisseur et pesait 860 kg. En 1992, cet instrument reçut une optique adaptative qui fit passer sa résolution de 0,5/1 à 0,07 seconde d'arc.

Aujourd'hui, le télescope Hale n'est plus utilisé par les professionnels, et est à disposition du public. Les instruments (caméras, spectrographes...) ont été remplacés par des oculaires. Regarder dans un pareil attelage doit vraiment valoir le déplacement !



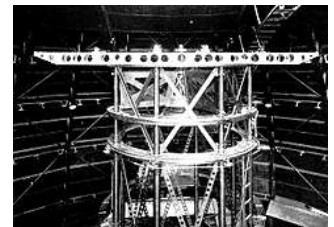
*Télescope Hale de 60"*



*Télescope Hooker de 100"*

Le second télescope du Mont Wilson – le télescope Hooker - fut mis en service, après bien des problèmes de construction, en 1917. C'est un miroir de 2,54 m (soit 100") fabriqué encore par Saint-Gobain. La particularité de sa monture, qui valut du retard à la mise en service, est un flotteur à mercure pour fluidifier ses mouvements.

Hooker fut le premier à expérimenter un interféromètre optique simulant la résolution d'un télescope de 6,1 m de diamètre.

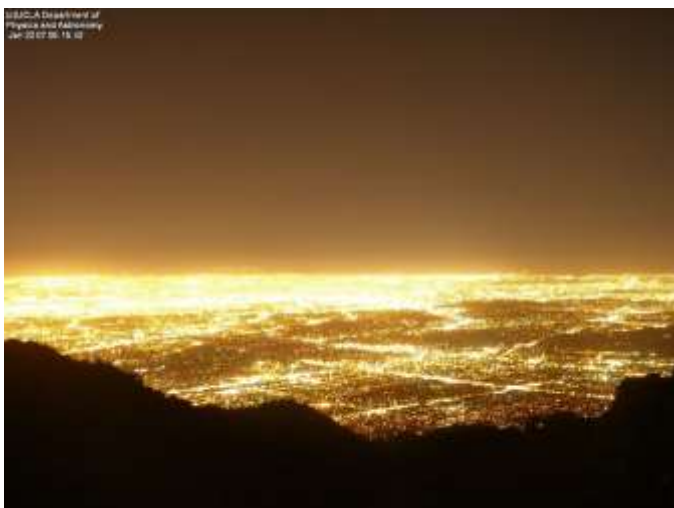


*Interféromètre Hooker*

Edwin Hubble travailla sur ce télescope, et y fit des observations qui le conduisit à démontrer l'expansion de l'univers.

Mis à la retraite en 1986, Hooker subit un rajeunissement en 1992 avec l'arrivée de l'optique adaptative. Sa résolution est aujourd'hui de 0,05 seconde d'arc.

Hooker détint le record du plus gros diamètre jusqu'en 1949, date de la mise en lumière du télescope de 5 m du Mont Palomar.



La photo ci-contre montre l'environnement nocturne de l'observatoire du Mont Wilson. On comprend que les études scientifiques de pointe y ont été abandonnées.





Le Mont Palomar est situé au sud de Los Angeles, à une altitude de 1815 m. L'observatoire compte 7 télescopes, dont le principal, qui reçut aussi le nom de Hale, a un diamètre de 200", soit 5,08 m. Il a été mis en service en 1949.

Ouvert à 3,3 (focale de 16,8 m), son miroir primaire pèse 25 tonnes et est en pyrex, après avoir tenté de le fabriquer en vain en Quartz. Il a nécessité 1 an de refroidissement et 11 ans de polissage !

L'ensemble, avec sa monture, pèse 530 tonnes.

Les télescopes du Mont Palomar sont encore utilisés aujourd'hui pour la recherche des géocroiseurs en particulier (programme NEAT).

Il a découvert Sedna en novembre 2003.

Il utilise une optique adaptative à laser.

Mais le record absolu des télescopes à miroir épais revient au 6 m de Zelentchouk (BTA-6), dans le Caucase (Russie).

Son miroir en borosilicate pèse 42 tonnes !

Mis en service en 1974, il n'a jamais été à la hauteur des espérances, et n'a jamais bien fonctionné : mauvais polissage, site peu favorable.



BTA-6 (Zelentchouk)



BTA-6 (Zelentchouk)

Cette tentative avec de grands miroirs épais fut la dernière. Pour aller plus loin en termes de diamètre, d'autres technologies ont été mises au point, comme les miroirs mosaïques et les miroir minces à optique active.

Le but des miroirs minces est d'alléger l'ensemble et par conséquent la monture qui le déplace. Mais les miroirs minces ont le défaut de se déformer sous leur poids. Ils sont donc soutenus par des systèmes de vérins qui garantissent leur forme. C'est l'**optique active**, à ne pas confondre avec l'**optique adaptative** qui elle, corrige les effets de la turbulence.

Les pages suivantes passent en revue les plus grands télescopes actuels, avec une liste classée par ordre décroissant de diamètre du miroir principal.

La description des principaux vient ensuite, en les regroupant par observatoire :

- Observatoire d'Hawaii
- Observatoires des Andes (La Silla, Paranal, Pachon...)
- Observatoire des canaries
- ...

## Les plus grands télescopes terrestres du monde

Le tableau suivant donne la liste des plus grands télescopes optiques d'aujourd'hui.

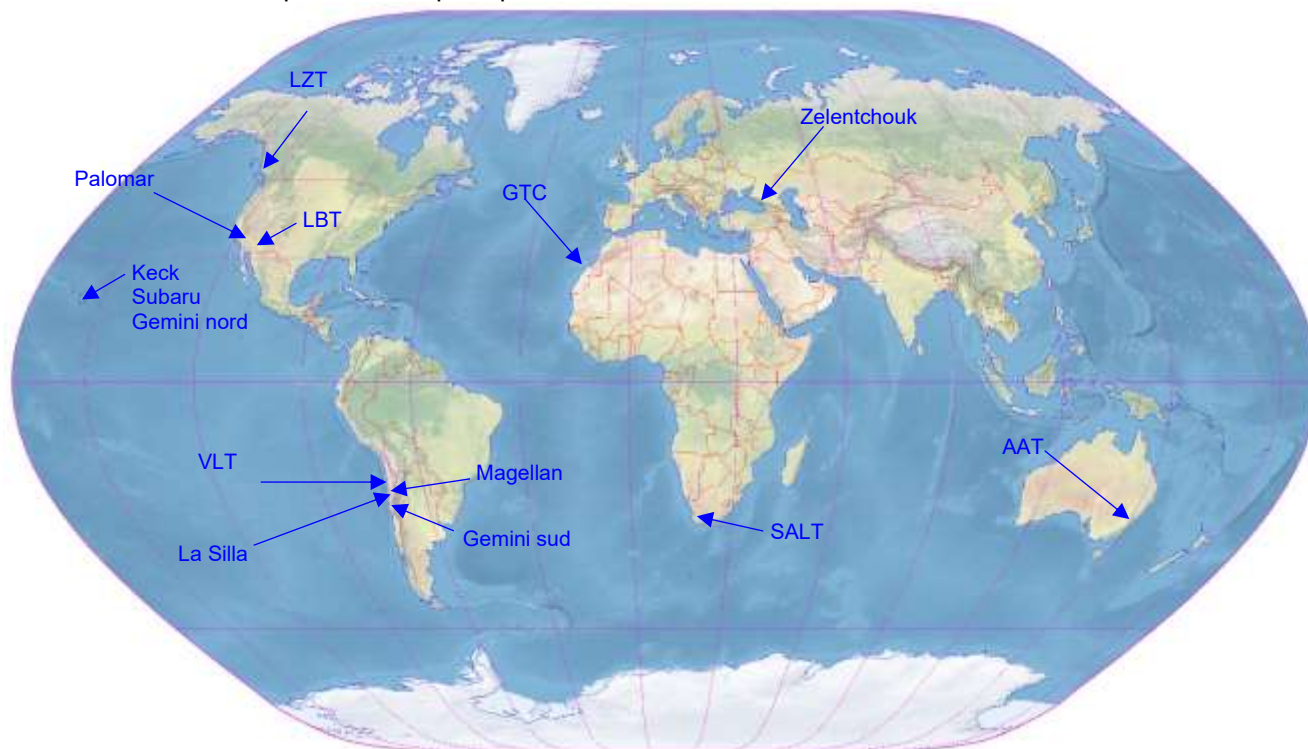
Nom	Diamètre	Appartenance	Site		Mise en service
				Altitude	
Southern African Large Telescope (SALT)	11,0 m (9,2 m)	Afrique du sud, USA, UK, Allemagne, Pologne, Nouvelle-Zélande	Sutherland (Afrique du sud)	1760 m	2005
Gran Telescopio Canarias (GTC)	10,4 m	Espagne	Canaries (Espagne)		2007/8
Keck 1	9,8 m	USA	Hawaii (USA)	4150 m	1993
Keck 2	9,8 m	USA	Hawaii (USA)	4150 m	1996
Hobby-Eberly Telescope (HEB)	9,2 m	USA Allemagne	Mt Fowlkes (USA)	1980 m	1997
Large Binocular Telescope (LBT)	2 x 8,4 m	USA, Italie, Allemagne	Mt Graham (USA)	3170 m	1997, 2004
Subaru	8,2 m	Japon	Hawaii (USA)	4140 m	1998
VLT 1 (Antu)	8,2 m	Europe	Cerro Paranal (Chili)	2635 m	1998
VLT 2 (Kueyen)	8,2 m	Europe	Cerro Paranal (Chili)	2635 m	1999
VLT 3 (Melipal)	8,2 m	Europe	Cerro Paranal (Chili)	2635 m	2000
VLT 4 (Yepun)	8,2 m	Europe	Cerro Paranal (Chili)	2635 m	2001
Gemini Nord	8,1 m	USA, UK, Canada, Chili, Australie, Argentine, Brésil	Hawaii (USA)	4200 m	1999
Gemini Sud	8,1 m	USA, UK, Canada, Chili, Australie, Argentine, Brésil	Cerro Pachón (Chili)	2720 m	2001
Monolithic Mirror Telescope (MMT)	6,5 m	USA	Mt Hopkins (USA)	2600 m	1999
Magellan	6,5 m	USA	Las Campanas (Chili)	2300 m	1998
BTA-6 (Zelentchouk)	6,0 m	Russie	Mt Pastoukhov (Russie)	2070 m	1976
Large Zenith Telescope (LZT) à mercure	6,0 m	Canada, France	Maple Ridge (Canada)		2003
Telescope Hale	5,0 m	USA	Mt Palomar (USA)	1700 m	1949
William Herschel Telescope	4,2 m	UK, Pays-Bas, Espagne, USA, Brésil	Canaries (Espagne)	2400 m	1987
SOAR	4,2 m	USA, Brésil	Cerro Pachon (Chili)	2738 m	2002
Anglo-Australien Telescope (AAT)	3,9 m	Australie, GB	Siding Spring (Australie)	1150 m	1974
Télescope 360	3,6 m	Europe	La Silla (Chili)	2400 m	1976
NTT	3,6 m	Europe	La Silla (Chili)		1989
Canada France Hawaii Telescope (CFHT)	3,6 m	Canada, France, Hawaii	Hawaii (USA)	4200 m	1979

Le VLT utilisé en interférométrie recrée l'équivalent d'un miroir de 16,4 m de diamètre, avec le pouvoir de résolution d'un télescope de 200 m de diamètre.

Les deux miroirs du LBT combinés représentent l'équivalent d'un miroir de 11,8 m de diamètre.

Tous ces télescopes étudient l'univers en lumière visible et en infrarouge. Ces longueurs d'ondes ne sont pas stoppées par l'atmosphère terrestre.

Cette carte montre la répartition des principaux observatoires dans le monde.



## **Technologies des miroirs primaires**

Comme vu précédemment, augmenter le diamètre du miroir revient à mettre au point une technique qui permette de l'alléger. La masse d'un miroir augmente comme le cube de son diamètre. De plus, pour conserver un minimum de forme au miroir, son épaisseur doit augmenter plus vite que son diamètre !

Pratiquement tous sont coulés dans des fours tournants, permettant de donner au miroir sa forme parabolique, ce qui évite la fastidieuse et périlleuse étape de l'ébauchage, d'autant plus que les miroirs actuels sont très ouverts, généralement moins de  $f/2$ .

Cela posé, il existe trois façons d'alléger un miroir primaire :

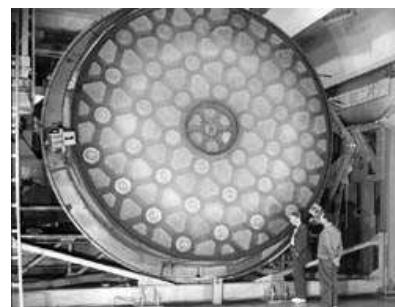
### **Le miroir alvéolé**

L'idée est de conserver un rapport épaisseur / diamètre de 8-10% pour assurer la rigidité de l'ensemble, mais d'évider dans la masse le dessous du miroir pour en diminuer le poids.

Le risque de casse est trop grand d'essayer de « creuser » le miroir. Il donc est coulé dans un moule contenant déjà les futurs évidements. Le premier miroir à bénéficier de cette technologie fut le télescope Hale du Mont Palomar.

On peut citer également :

- Le MMT
- Les deux télescopes Magellan
- Le LBT



*Miroir alvéolé du télescope du Mt Palomar*



## Le miroir segmenté

Cette technique divise un miroir de grand diamètre en plusieurs miroirs de plus petite taille. Si chaque segment est suffisamment petit, son épaisseur relative assurera sa rigidité. La difficulté est l'ajustement des segments entre eux pour fournir une surface correcte. Les miroirs étant généralement non sphériques, et chaque segment est taillé différemment.

L'ajustement doit être du même niveau de précision que la taille du miroir de diamètre équivalent, soit quelques dizaines ou centaines de nanomètres.

L'*optique active* résout ces problèmes de rigidité des grands segments et de leur ajustement. Chaque segment est soutenu par des micro-vérins qui mesurent en temps réel les déformations et les compensent. Les USA avec leurs deux Keck ont une large expérience de ce type de technologie.

La qualité optique finale est très bonne, mais n'atteint pas la performance des miroirs monolithiques.

C'est actuellement la seule technologie qui permette d'envisager des télescopes géants de plus de 15/30 m de diamètre, comme certains projets des grandes agences.

Les principaux miroirs segmentés :

- Les deux Keck
- Le HEB
- Le GTC
- Le SALT

*Miroir segmenté du HEB*



## Le miroir mince

Ce type de miroir est éminemment déformable. Il est très léger (relativement au même diamètre classique) et sa forme est assurée par des vérins situés en dessous et à côté. Le transport et les différentes manipulations du miroir sont aussi effectués sur des vérins, pour éviter simplement la casse de cette « voile flottante ».

L'élasticité du verre est la propriété utilisée. Tant que cette élasticité est linéaire, toute déformation peut être compensée. La précision de l'ajustement dépend de l'espacement entre les vérins.

La forme du miroir est malléable à volonté, et permet même de corriger des défauts de polissage (jusqu'à un certain point...), ce qui simplifie ce dernier et diminue les coûts.

La forme du miroir est analysée en permanence, et les défauts résiduels sont corrigés en même temps : astigmatisme, défauts dus aux variations de température, aux flexions diverses...).

Voilà la raison de la qualité exceptionnelle de ces miroirs. La technique a été mise au point sur le NTT (observatoire de la Silla) par l'ESO, et appliquée sur le VLT.

Principaux miroirs minces :

- VLT
- Gemini
- Subaru
- NTT

On trouvera en dernière page de ce document les tailles relatives des plus grands miroirs terrestres.

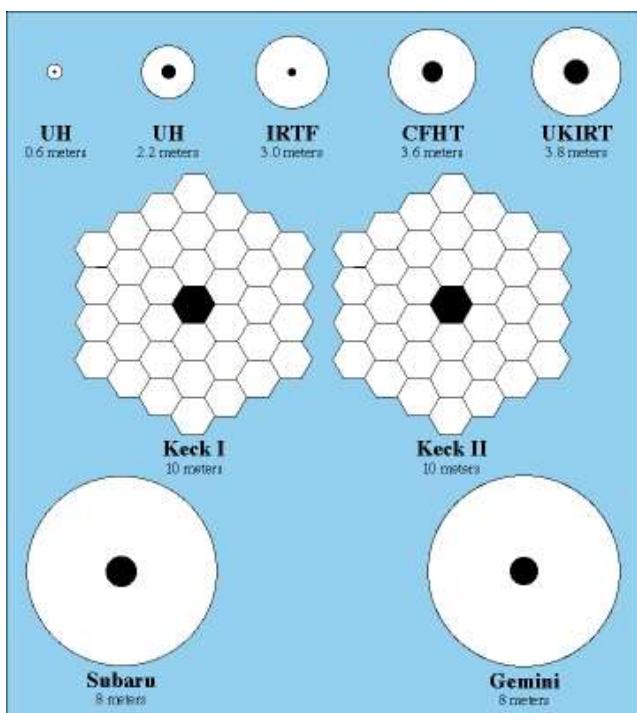
## L'Observatoire d'Hawaii

Il est situé sur la Grande Ile d'Hawaii, 50<sup>ème</sup> état des Etats-Unis, au sommet du volcan Mauna Kea qui culmine à 4 200 m.

Les astronomes de 11 pays différents se partagent l'utilisation des 13 télescopes de ce site qui est l'un des meilleurs du monde. L'atmosphère y est très sèche (important pour l'infrarouge) et stable, la pression y est 40% inférieure à la pression au niveau de la mer. La proportion de nuits sans nuages est l'une des plus favorable du monde (>350 jours/an).



*Observatoire du Mauna Kea*



9 des 13 télescopes d'Hawaii travaillent dans le domaine optique visible et infrarouge, 3 sont cantonnés aux longueurs d'ondes submillimétriques, et le dernier est le VLBA (Very Long Baseline Array), radiotélescope interférométrique.

Cette illustration donne une idée de la taille relative des différents télescopes installés sur le Mauna Kea.

Les principaux grands télescopes d'Hawaii sont les Keck, le Gemini, le Subaru et le CFHT. Les autres télescopes du site sont spécialisés en UV, IR ou radio.

### **Les Keck**



*Les deux télescopes Keck*

Miroir primaire : 2x10 m, constitués d'une mosaïque de 36 miroirs hexagonaux de 90 cm de côté en zérodur.

Aluminure refaite tous les 2 ans.

Formure optique : Ritchey-Chretien.

Montures Alt-Azimutales de 270 tonnes chacun.

Optique active.

Optique adaptative par laser.

Interférométrie IR (visible en projet). Les 2 Keck sont séparés de 85 mètres.



## Le Subaru

Télescope japonais installé près des Keck sur le Mauna Kea (Hawaii). Le nom « Subaru » est la traduction en japonais des « Pléiades ».



Miroir primaire : Diamètre : 8,20 m monolithique  
Épaisseur : 20 cm.  
Poids : 22,8 tonnes  
Erreur de forme : 14 nanomètres  
Focale : 15 m ( $F/D = 1,83$ )  
Matériau : verre ULE (Ultra Low Thermal Expansion glass)

Monture : Alt-Azimutale  
Poids : 555 tonnes  
Hauteur : 22,2 m  
Vitesse de déplacement maxi :  $0,5^\circ/\text{s}$   
Précision de suivi sans guidage :  $0,1''$

4 foyers : Foyer primaire à  $f/2$  avec correcteur  
Foyer cassegrain :  $f/12,2$   
2 foyers Nasmyth à  $f/12,6$

Meilleure résolution obtenue :  $0,2''$  sans optique adaptative, en IR.

Optique active

Optique adaptative

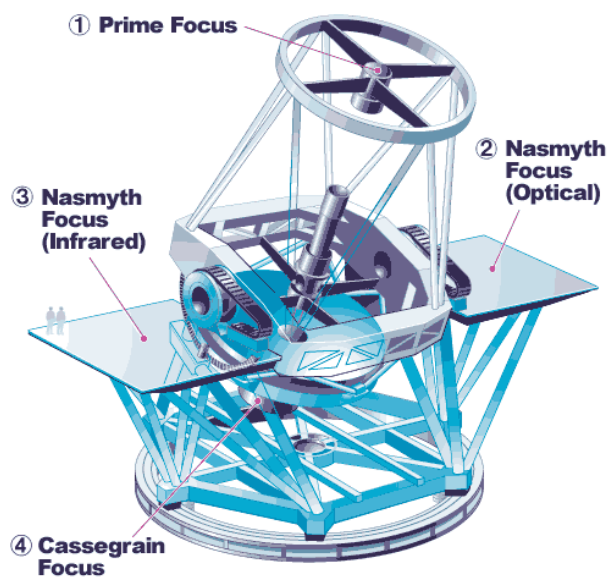


Illustration by Takaetsu Endo, taken from Nikkei Science 1996



## Le Gemini Nord

Gemini est un ensemble de deux télescopes situés dans chacun des deux hémisphères terrestres.

Le Gemini Nord (photo ci-contre) est localisé sur le Mauna Kea à Hawaii, à 4 200 m d'altitude.

Le Gemini Sud (voir le chapitre sur les observatoires des Andes) est installé dans les Andes chiliennes, au Cerro Pachón, à 2 700 m d'altitude.

Les deux télescopes ont les mêmes caractéristiques mais certains instruments sont différents.



Gemini Nord



Miroir primaire : Diamètre : 8,10 m monolithique  
Epaisseur : 20 cm.  
Poids : 22,2 tonnes  
Erreur de forme : 15 nanomètres  
Matériau : céramique haute performance (*Corning*)

Formule optique : Cassegrain

Monture : Alt-Azimutale

Meilleure résolution obtenue : 0,08'' avec optique adaptative, en IR.

Optique active : 120 vérins

Optique adaptative



## Le CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope)

Miroir primaire : Diamètre : 3,6 m monolithique  
Épaisseur : 60 cm.  
Poids : 14 tonnes

4 foyers.

Particularité : caméra Megaprime : 360 millions de pixels (20 000 x 18 000 pixels), 25 cm x 25 cm, champ de  $1^\circ \times 1^\circ$ , refroidie à  $-120^\circ\text{C}$ . Construction française.



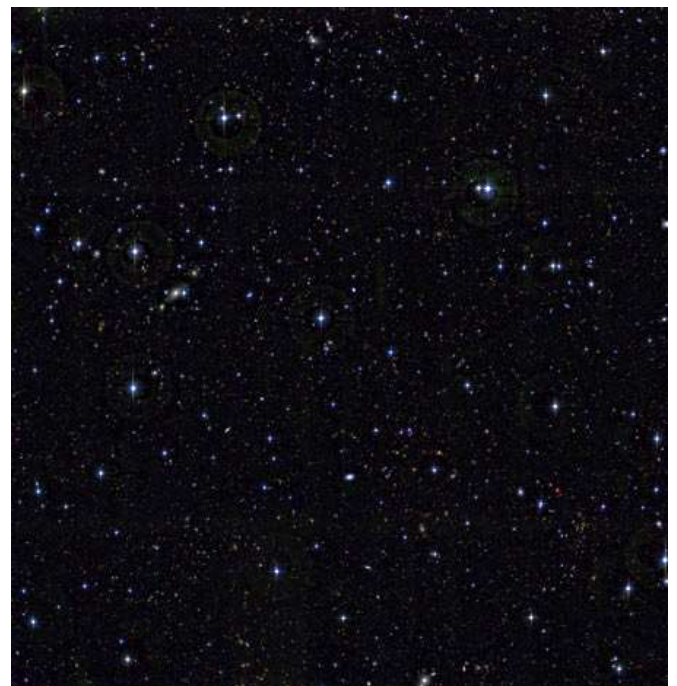
Correcteur de champ pour le degré carré : 5 lentilles de 50 à 81 cm de diamètre, 660 kg. Taillé par REOSC.  
L'ensemble caméra correcteur de champ a été utilisé pour réaliser un champ profond (Deep Field 1) du ciel de  $1^\circ$  carré qui compte 60 000 galaxies après plusieurs dizaines d'heures de pose.



Malgré sa petite taille, le CFHT a sa place au milieu des géants de 8-10 mètres. Son avantage principal est sa caméra grand champ, avec un programme spécial d'observations à venir de 500 nuits sur 5 ans comprenant :

- Observation des transneptuniens.
- Structure de l'univers à grande échelle en utilisant les lentilles gravitationnelles.
- Étude des supernovas lointaines (primitives) pour la caractérisation de l'énergie sombre.

Ce télescope est également un laboratoire test pour l'optique adaptative des plus grands télescopes. Il a permis la mise au point de cette technique en IR, et travaille depuis quelques années sur l'optique adaptative dans le visible.



Deep Field 1

## Les observatoires des Andes

C'est l'équivalent d'Hawaii dans l'hémisphère sud du point de vue de la qualité des sites.

Les Andes abritent entre autres l'observatoire de La Silla, du Cerro Paranal, de Las Campanas et du Cerro Pachón.

### **Observatoire de La Silla**

A une altitude de 2 400 m environ dans le désert d'Atacama, l'observatoire comporte 19 télescopes dont la plupart sont hors service. C'est historiquement le premier observatoire de l'ESO.

A sa proximité immédiate, visible depuis La Silla, se trouve l'observatoire de Las Campanas avec ses deux Magellan.

Le principal télescope de La Silla, est le « 3.6 m ». On y trouve également le NTT (New Technology Telescope) qui a servi de banc de test de l'optique adaptative du VLT, ainsi qu'un 2,2 m de l'Institut Max Planck.



Le site, s'il fut l'un des meilleurs du monde en son temps, a été dépassé par la construction des télescopes de la génération des 8-10 m.

*Pétroglyphes à La Silla*



Le télescope 3,6 m :



Miroir primaire : 3,57 mètres

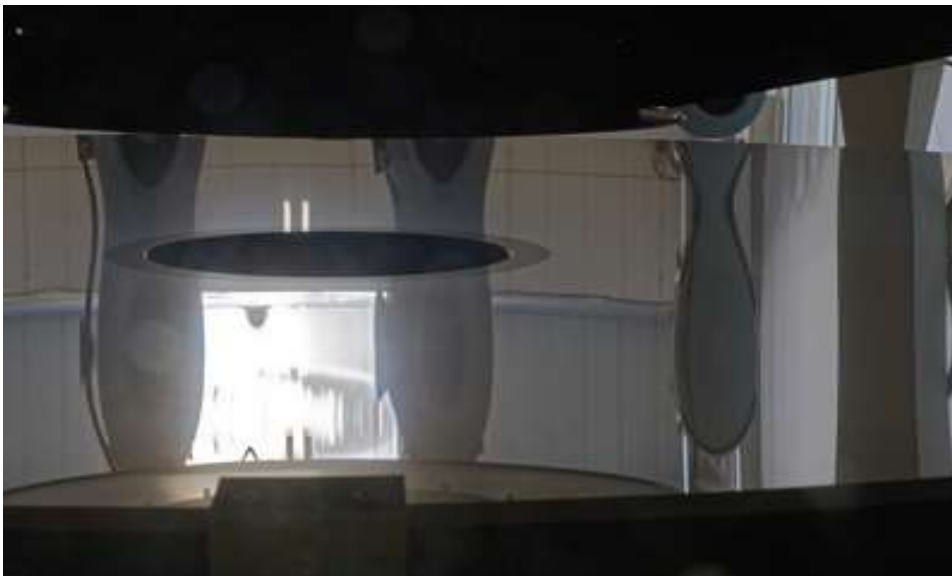
Monture à fer à cheval de 200 tonnes

Formule Ritchey-Chretien (primaire et secondaire hyperboliques)

## Le NTT (New Technology Telescope)



La coupole du NTT.  
Elle est optimisée pour l'écoulement d'air afin de limiter les différences de température entre l'extérieur et l'intérieur.



Le miroir primaire du NTT est en zérodur, a un diamètre de 3,58 m et une épaisseur de 24 cm.

Il est équipé de l'optique active avec 75 actionneurs situés en dessous, et 24 latéraux.



## Observatoire de Las Campanas

Situé à 27 km au nord de La Silla, cet observatoire abrite les deux télescopes Magellan de 6,5 m de diamètre à une altitude de 2 300 m.

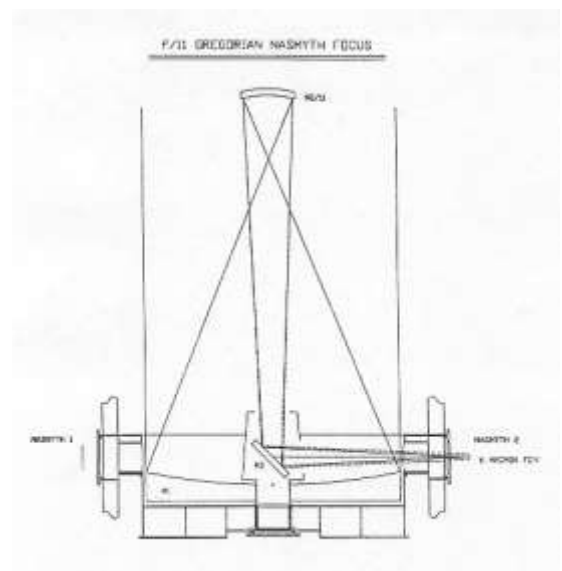


### Les Magellan :

Miroir primaire : 6,502 mètres de diamètre  
 $F/D = 1,25$   
Parabolique

Champ au foyer  $F/D 11$  : 24 minutes d'angle

Monture altazimutale de 150 tonnes.





## L'observatoire du Cerro Paranal



Sur cette montagne de 2 635 mètres d'altitude, en plein désert de l'Acatama au nord du Chili, se trouvent les 4 télescopes de l'ESO appelés VLT (Very Large Telescope).

A droite, on trouve le télescope VST (VLT Survey Telescope) de 2,65 m de diamètre, chargé du recensement systématique des objets célestes.

Il est équipé d'une caméra de 268 Mpixels donnant un champ de 1°.

Avec un autre télescope situé non loin du Cerro Paranal, il produit 100 Téraoctets de données par an !

Les principaux avantages de ce site sont les suivants :

- Couverture nuageuse quasi inexistante (350 nuits claires par an !).
- L'altitude limite des perturbations atmosphériques et réduit sa densité.
- La proximité de la mer (à 12 km seulement) limite les différences de température entre le sol et l'atmosphère.
- Loin de toute activité humaine.

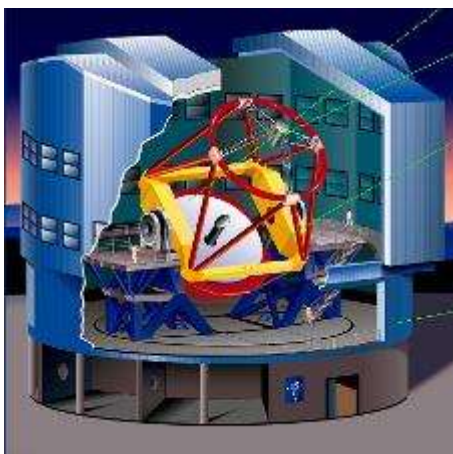
Le seul inconvénient est que le site se trouve près de la plaque tectonique de Nazca, et peut être sujet aux tremblements de Terre. Les constructions sont de type antisismique.

### Le VLT

Le VLT est un ensemble de 4 télescopes de 8,2 m de diamètre chacun (UT1 à UT4 pour *Unit Telescope*) et de 3 télescopes auxiliaires de 1,8 m chacun (AT1 à AT3 pour *Auxiliary Telescope*).

Les télescopes auxiliaires (en bas à droite) servent dans le mode interférométrique.

Les 4 télescopes principaux peuvent être utilisés seuls, ou en combinaison, interférométrique ou pas.



Le nom des télescopes est celui d'objets astronomiques dans le dialecte local, le Mapuche.

UT 1	Antu	Le Soleil
UT 2	Kueyen	La Lune
UT 3	Melipal	La Croix du Sud
UT 4	Yepun	Vénus

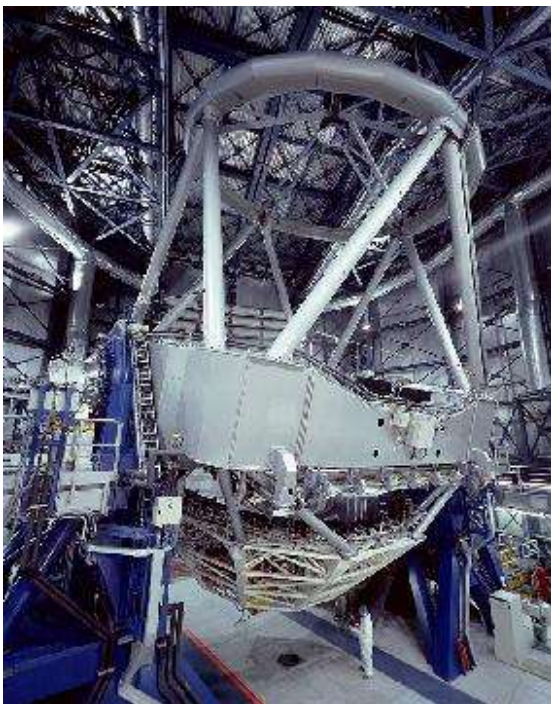
Chacun des 4 miroirs des télescopes principaux a les caractéristiques suivantes :

Matière :	Zérodur (verre à très faible coefficient de dilatation)
Diamètre :	8,20 mètres monolithique (avec une ouverture centrale de 1m)
F/D :	1,8
Rayon de courbure :	28,8 m
Epaisseur :	17,5 cm
Poids :	23 tonnes
Fabricant :	Schott (coulé dans un moule en rotation, refroidissement en 9 mois)
Taille :	Réosc



214 vérins sont nécessaires pour le soutenir (optique active).

Les miroirs secondaires sont convexes hyperboliques de 1,116 m de diamètre. Leur rayon de courbure est de 4,50 m. Ils sont fixés à la monture par un système leur permettant de se positionner parfaitement en temps réel (5 degrés de liberté) selon les variations thermiques de la haute atmosphère. Ils sont réalisés en Béryllium et ne pèsent que 51 kg chacun.



Chaque UT est équipé de 3 foyers principaux (un cassegrain et deux Nasmyth). Le foyer Cassegrain nécessite des instruments légers tournant avec le Telescope, ce qui n'est pas le cas des foyers Nasmyth (le miroir tertiaire M3 est tournant). Un quatrième foyer, dit « foyer coudé » renvoie la lumière sous le Telescope vers d'autres bâtiments et sert en interférométrie.

Les montures sont de type Altazimutale et leur structure pèsent 430 tonnes chacune.

Les bâtiments les abritant (29 m de diamètre et 28,5 m de haut, et un sous-sol de 4,5 m de haut) sont de conception nouvelle. La « coupole » tourne avec le télescope. La partie ouvrante est légère, et s'écarte laissant une ouverture de 9 mètres d'avant en arrière, ce qui permet le passage d'un léger courant d'air laminaire. Renforcée par des ouvertures latérales commandables à volonté, ce système donne un équilibre rapide des températures externes et internes.

Les UT sont équipés de l'optique adaptative, qui permet d'approcher la résolution théorique des instruments. Cette technique est au point dans l'infrarouge, en encore expérimentale dans le visible.

Les VLT peuvent fonctionner en trois modes :

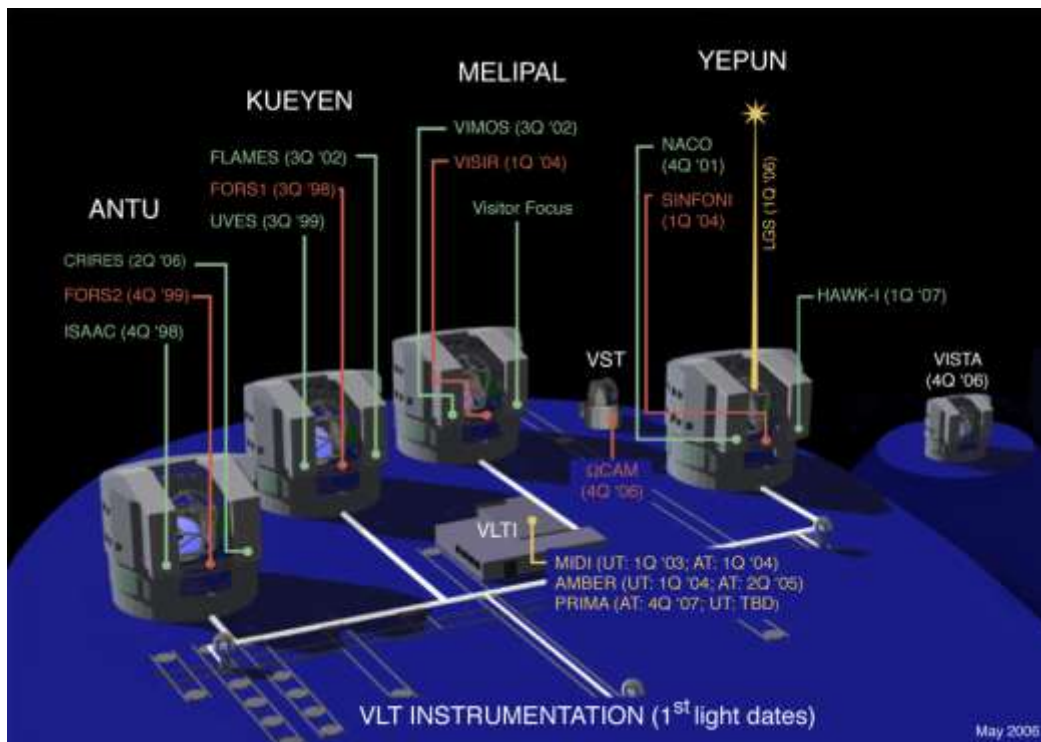
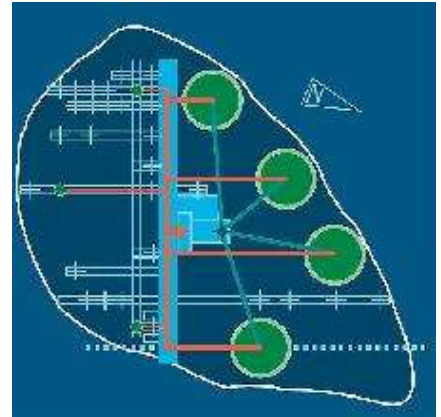
- Utilisation des 4 télescopes indépendamment l'un de l'autre.
- En mode recombineur. Les images des 4 miroirs sont recombinaées de façon à produire la même image qu'un télescope équivalent de 16,6 m de diamètre, mais avec la même résolution qu'un seul.
- En mode interférométrique (VLTI). Ce mode est très utilisé en radioastronomie, mais très difficile à mettre au point en optique. Le VLT pourra, lorsque la technique sera au point, recombinaer par interférométrie les signaux des UT pour former une image finale avec une résolution allant jusqu'à l'équivalent d'un télescope unique de 200 mètres de diamètre ! Mais la surface collectrice restera celle d'un seul UT.

Actuellement, seul le premier mode est opérationnel. Le troisième mode (VLTI) utilise 3 instruments :

- AMBER : Recombine 3 UT dans l'infrarouge proche (1 à 2,4  $\mu$ )
- MIDI : Recombine 2 UT dans l'infrarouge lointain (7 à 14  $\mu$ )
- VINCI : Instrument de test pour 2 UT dans l'infrarouge proche

La limite de diffraction sera atteinte entre 10 et 20  $\mu$ .

La résolution est de 0,001" à une longueur d'onde de 1  $\mu$ , ce qui permettra de voir un homme sur la Lune.



L'instrumentation des VLT est très variée. Le schéma ci-contre les détaille.

Les instruments travaillent en lumière visible (FORS, VIMOS, UVES...) ou en infrarouge (ISAAC, VISIR...). Presque tous sont capables de fournir des images ou des spectres, et sont munis de l'optique adaptative.

En mode spectroscopique, certains instruments sont équipés de la technologie « multi objets ». Des fibres optiques captent certains points de l'image globale et en déduisent un spectre. On peut ainsi, en une seule pose, obtenir plusieurs dizaines ou centaines de spectres.



## L'observatoire du Cerro Pachón

Cet observatoire est celui du télescope Gemini Sud.

Il est le frère jumeau du Gemini Nord installé à Hawaï. Ses caractéristiques sont identiques.





## L'observatoire d'Afrique du Sud

En anglais, South African Astronomical Observatory SAAO, l'observatoire est situé dans le désert du Kalahari à une altitude de 1 800 m.

Le seul télescope de grande taille de cet observatoire est le **SALT** (Southern African Large Telescope). L'observatoire compte d'autres instruments de moins de 2 mètres répartis dans le pays.

Le SALT est financé et utilisé par l'Afrique du Sud, les USA, la Pologne, l'Allemagne, le Royaume-Uni et la Nouvelle Zélande. Il a un clone aux USA : le HEB (Hobby Eberly Telescope).



Son miroir primaire sphérique est composé de 91 petits miroirs hexagonaux de 1 m de diamètre.

Le diamètre total est de 11,1 mètres pour 9,2 m de diamètre effectif.

La monture est fixe en altitude et tourne en azimut. L'inclinaison est de  $37^\circ$  par rapport à la verticale. C'est le miroir secondaire, mobile sur un axe, qui permet de pointer différentes régions du ciel et de suivre la rotation terrestre au cours des poses.

Le système de poursuite (tracker) fait appel des roulements de tables tournantes, galets de roulement sur axe, bras télescopiques et articulations à cardan de précision.

Cette technologie, identique à celle utilisée par exemple en radioastronomie à Arecibo (Porto Rico), apporte un gain en poids de l'ensemble (seulement 45 tonne complet) et des économies financières à la construction et à l'entretien.



A noter qu'un 18 trous est en projet non loin du télescope, sur la même commune, qui désire booster le tourisme local...

## Observatoire de l'Institut d'Astrophysique des Canaries

L'institut d'Astrophysique des Canaries gère deux observatoires dans l'archipel.

Le premier est l'observatoire du Teide et abrite le télescope THEMIS dédié à l'observation solaire.

Le second nous intéresse plus particulièrement. Il se trouve sur l'île de La Palma et est localisé sur le Mont Roque de los Muchachos à 2 400 m d'altitude. Il héberge, le GTC.

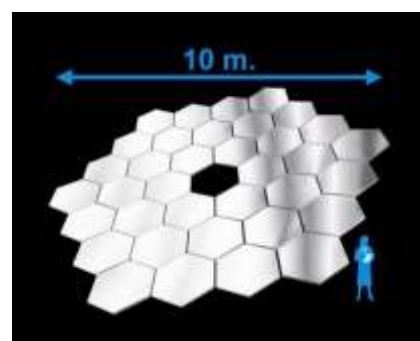


### **Le GTC (Gran Telescopio Canarias)**

Ce télescope a été mis en service en juillet 2007. Ses premières données scientifiques datent de juillet 2009.

Miroir primaire : Zérodur segmenté de 10,4 m de diamètre, il comporte 36 miroirs hexagonaux de 1,9 m de diagonale chacun et 8 cm d'épaisseur. Le poids total du miroir est de 470 kg. Réalisé par REOSC.

Comme les autres, il est équipé de l'optique active et de l'optique adaptative.



Miroir secondaire : hyperbolique monolithique, diamètre de 1,2 m pour un poids de 65 kg.

Formule optique : Ritchey-Chretien

Monture altazimutale.



## Observatoire International du Mont Graham

Observatoire américain situé en Arizona.



### Le LBT (Large Binocular Telescope)



Composé de deux miroirs de 8,4 mètres chacun, dont les centres sont séparés de 14 mètres.

Miroirs primaires : monolithiques, paraboliques, ouverts à 1,14 et un poids de 20 tonnes.

L'ensemble pèse 580 tonnes.

En mode interférométrique, il se comportera comme un unique télescope ayant la résolution d'un 22,8 m.



Le LBT préfigure le Grand Telescope Magellan, composé de 7 miroirs de 8,4 m ! (Voir le chapitre suivant).



## L'Observatoire Anglo-Australien (Siding Spring)

L'observatoire de Siding Spring domine le Mont Stromolo situé à 400 km au nord-ouest de Sidney.

Il accueille deux télescopes principaux : le Schmidt de 50 cm, et le AAT, Anglo-Australian Telescope.



### **L'AAT (Anglo-Australien Telescope)**

Opérationnel depuis 1974, ce télescope possède un miroir monolithique de 3,9 m de diamètre. Il est ouvert à  $f/d = 3,25$  (focale = 12,7 m).



Sa monture équatoriale en fer à cheval en fait le plus grand télescope de ce type (abandonné). Il est aujourd'hui équipé de l'optique adaptative.

Mais sa célébrité lui vient de David Malin (1941- ), astrophotographe de génie qui a été le premier à mettre au point la technique de la trichromie en argentique, avec masque flou sur chaque couche de couleur.

Il faut rappeler qu'à l'époque, les capteurs CCD n'existaient pas, et que les prises de vues de David Malin, accroupi dans la cage du secondaire, étaient réalisées sur des plaques argentiques, et les masques flous faits sous l'agrandisseur.



*La tête de cheval (constellation d'Orion) par David Malin*

La technique est aujourd'hui dépassée par les performances des capteurs CCD, mais David Malin a été le premier à éditer de belles images.

Le principe a largement inspiré les responsables du marketing des observatoires actuels, qui sortent régulièrement de belles photos pour le grand public, montrant ainsi que l'argent des contribuables est bien utilisé.

Une galaxie porte son nom : Malin 1, découverte par lui en 1986, et qui est à ce jour la plus grande galaxie connue (660 000 al de diamètre, située à 1,2 milliards d'al du Soleil).



## L'observatoire du LZT (Large Zenith telescope)

Pour terminer, un grand télescope original, le Large Zénith Telescope LZT.

Il s'agit du plus grand télescope à miroir liquide (mercure).

L'avantage de la formule est un coût réduit, mais au détriment de quelques inconvénients :

- Le mercure est toxique.
- Il s'oxyde facilement et doit être régulièrement épuré.
- Il vise uniquement le zénith.

Il est la collaboration de l'Université Laval (près de Montréal – Québec), de l'UBC (University of British Columbia) et de l'IAP (Institut Astrophysique de Paris).

Le site retenu est à 70 km à l'est de Vancouver (Colombie Britannique – Canada).

Le miroir a un diamètre de 6 mètres et pèse 3 tonnes. Pour le mercure, cela représente un volume de 220 litres. Réparti sur les 6 mètres de son diamètre, l'épaisseur moyenne est de 7,8 mm !

La forme parabolique du miroir est donnée par sa rotation, ajustée avec une précision d'un millionième. Sa focale est de 10 mètres ( $F/D = 1,7$ ). La flèche au centre du miroir en rotation est de 22,6 cm. Il va sans dire que le récipient contenant le mercure a déjà une forme approchant celle de la parabole de 10 m de focale.

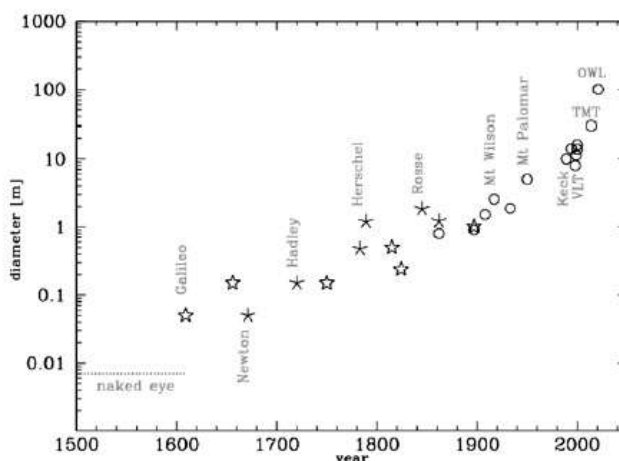
Le miroir secondaire assure le suivi.



## Les grands projets

La technologie évoluant à vitesse grand V, Il faut s'attendre dans les décennies à venir à une débauche de grands projets. Tous ne seront pas concrétisés, mais le sens de l'histoire est représenté par le graphique ci-contre. Remarquer l'échelle logarithmique des diamètres.

Le début de ce siècle a vu apparaître la génération des « 8 mètres » (13 ont déjà vu le jour). Il semble que ce soit une limite aux miroirs monolithiques.



Des progrès devront être encore réalisés dans bien des domaines (optique, mécanique, informatique...). Ces futurs instruments seront segmentés, et bénéficieront de l'optique active, de l'optique adaptative, et l'on peut parier sur l'interférométrie routinière.

Pourquoi de si grands télescopes ?

D'abord pour repérer des exoplanètes, grand sujet actuel. Ensuite, pour confirmer (ou infirmer) l'hypothèse de la matière noire et de l'énergie sombre. 95% de l'univers nous sont cachés. Que de découvertes en perspective...

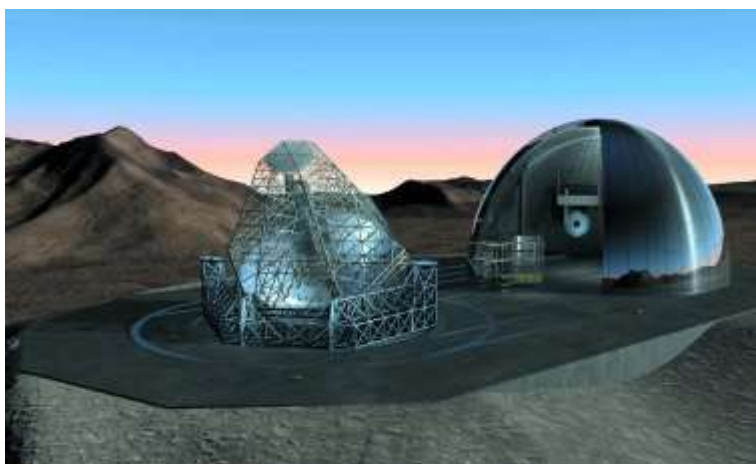
L'avenir est aux télescopes spatiaux qui s'exonèrent de l'atmosphère, mais sont chers et très Hi-Tech. Les télescopes terrestres essaieront de faire aussi bien.

Les USA et l'Europe ont des projets de grands télescopes.

USA :	Le GMT	Dont il a déjà été question (Giant Magellan Telescope), composé de 7 miroirs monolithiques de 8,4 m de diamètre disposés en pétales. Livraison prévue après 2022.
	Le TMT	Télescope de 30 m (Thirty Teter Telescope) inspiré des Keck, miroir segmenté comportant 738 miroirs hexagonaux de 1,2 m de diamètre et 4,5 cm d'épaisseur.
	Le LSST	Télescope de 8,42 m (Large Synoptic Survey Telescope) sera (> 2020) équipé d'une caméra donnant un grand champ de 3,5° ! Il photographiera tout le ciel austral en 3 jours, pendant 10 ans.
Europe :	L'ELT	Télescope de 39 m de diamètre (Extremely Large Telescope). Il recevra 2 fois plus de lumière que le projet américain TMT.

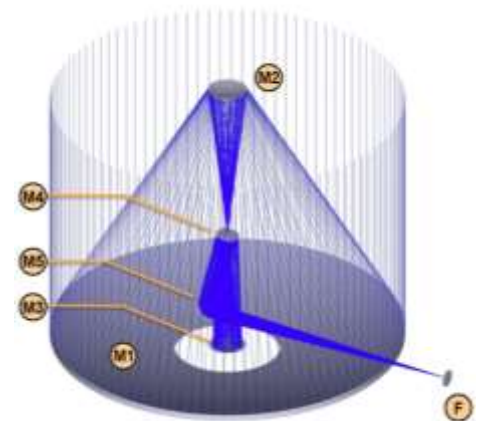
A noter que le projet européen OWL (OverWhelmingly Large = immensément grand), télescope segmenté de 100 m de diamètre, a été abandonné. D'une part les coûts sont exorbitants, d'autre part, le temps nécessaire à la mise au point des technologies donnerait un avantage trop important aux USA avec leur projet moins ambitieux de télescope de 30 m.

Projet OWL





L'ELT remplacera donc le OWL, avec tout de même un diamètre de 39 m ! Il est en cours de construction sur le Cerro Armazones (ci-contre), à 23 km à l'est du Cerro Paranal. L'inauguration est prévue en 2025...



Le miroir primaire de 39 m de diamètre, sera composé de 798 miroirs hexagonaux de 1,45 m de diamètre et 40 mm d'épaisseur ! Sa masse sera de 150 tonnes, et il sera soutenu par 30 000 supports corrigeant sa forme en temps réel (optique active).

Sa focale sera de 35 m, soit un rapport F/D de 0,9.

Le miroir secondaire fera 4 m de diamètre.

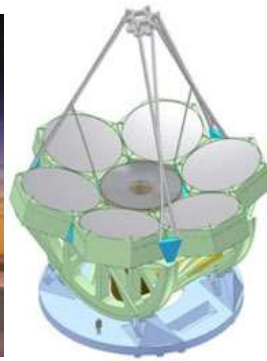
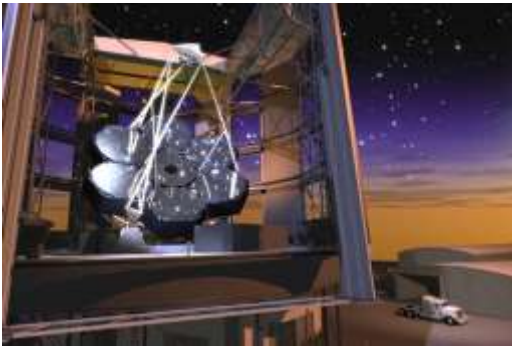
La structure du télescope aura une masse de 2 800 tonnes.

Le dôme fera 79 m de hauteur et 86 m de diamètre.

Le pointage de l'instrument aura une précision de 1" d'arc, et celle de son suivi sera de 0,3" d'arc.

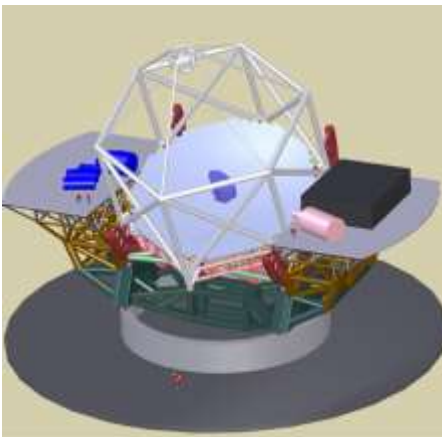


## Le GMT



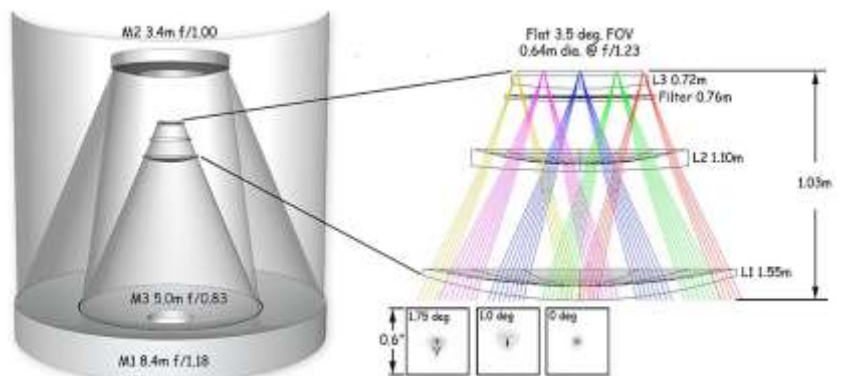
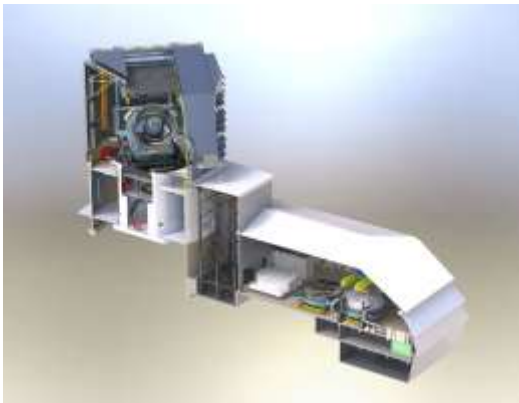
Situé à l'observatoire de Las Campanas.  
Mise en service : après 2022.  
Diamètre équivalent du miroir primaire : 25,45 m (7 miroirs de 8,4 m).  
Diamètre du secondaire : 3,2 m.  
Résolution attendue : 0,01''

## Le TMT



Situé à Hawaii sur le Mauna Kea.  
Mise en service : après 2020.  
Miroir primaire de 30 m composé de 492 miroirs hexagonaux de chacun 1,40 m, contrôlés par optique active.  
Optique adaptative.  
Masse totale : 2 000 tonnes avec les instruments.  
Résolution attendue : 0,015''.

## Le LSST



Le miroir primaire fera 8,4 m, le secondaire 3,4 m et le tertiaire (combiné avec le primaire) 5 m.



La caméra (champ de 3,5°) aura un capteur de 64 cm de diamètre, qui sera composé de 3,2 milliards de pixels de 9  $\mu$  contenus dans 189 capteurs CCD individuels de 8 Mpixels.

Cette caméra pèsera 2,8 tonnes, sera longue de 3 m et aura un diamètre de 1,7 m !

Comparaison des diamètres des grands télescopes terrestres :

