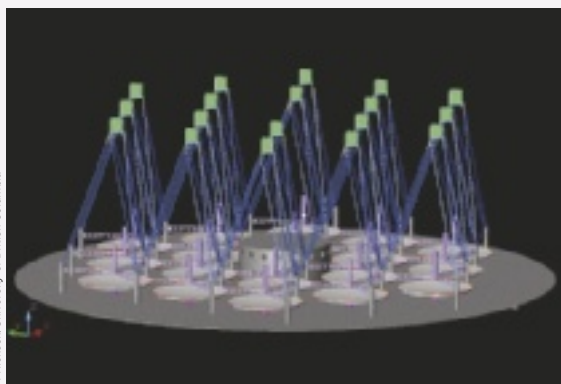


Les autres projets de télescopes géants

RÉSEAU DE MIROIRS LIQUIDES DE GRANDE OUVERTURE (LAMA)



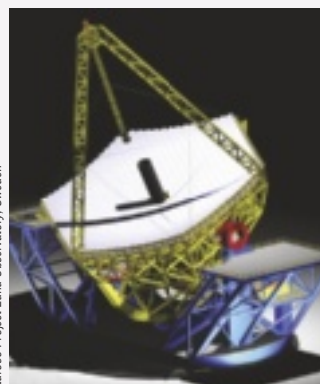
Équivalent à 42 mètres pour la sensibilité,
à 54 mètres pour la résolution
40 millions d'euros
18 miroirs paraboliques de 10 mètres de diamètre
en mercure liquide, pointant à la verticale
<http://www.astro.ubc.ca/LMT/lama/>

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



« Il est en Syrie une région nommée Phénicie confinante à la Judée et contenant au pied du mont Carmel, un marais appelé Candebia. On croit qu'il donne naissance au fleuve Bélus qui après un cours de cinq mille pas se jette dans la mer auprès de la colonie de Ptolémaïs... Selon la tradition, un navire portant des marchands de nitre vint y aborder, et, comme les marchands dispersés sur le rivage, préparaient leur repas et ne trouvaient pas de pierres pour rehausser leurs marmites, ils les remplacèrent par des mottes de nitre [natron] tirées de leur cargaison. Quand celles-ci furent embrasées, mêlées avec le sable du rivage, des ruisseaux translucides d'un liquide inconnu se mirent à couler et telle fut l'origine du verre. »

Plinie l'Ancien, *Histoire naturelle*, XXXVI, 65

Cette légende rapportée par Plinie situe la découverte de la recette du verre près de l'embouchure du fleuve Bélus sur la côte syro-palestinienne. Elle souligne la part due au hasard dans l'invention du matériau, tout en donnant l'idée que les Anciens s'en faisaient : un mélange fusible

de sable et de natron (du carbonate de sodium). Nous savons aujourd'hui que trois ingrédients sont nécessaires pour obtenir du verre : environ 60 pour cent de silice (l'agent vitrifiant), de la soude ou de la potasse pour abaisser le point de fusion entre 1 000 et 1 100 °C (l'agent fondant) et de la chaux (ou tout autre agent stabilisant) pour rendre le verre résistant et l'empêcher de se dissoudre à long terme. La recette antique, quant à elle, ne comprend que deux ingrédients.

Pour autant, les plus anciens objets de verre ne sont pas syro-assyriens, mais mésopotamiens, et remontent au III^e millénaire avant notre ère. Au II^e millénaire, des artisans mésopotamiens réalisaient de petits réci-

pients à partir d'éléments préfabriqués ou les modelaient à partir d'un noyau de verre. Toutefois, il n'existe probablement de véritable artisanat du verre que depuis les découvertes évoquées par Plinie l'Ancien dans le monde assyrien. Elles eurent probablement lieu vers le VIII^e siècle avant notre ère, et furent suivies par le développement d'une production et d'un artisanat verriers au Proche-Orient et en Égypte à l'époque hellénistique. Ainsi, le verre fut d'abord une matière précieuse venue d'Orient que les navires commerciaux transportaient jusqu'en Occident. Il conserva ce statut de produit de luxe pendant l'ère romaine jusqu'à l'invention du soufflage, qui, facilitant la production manufacturière, suscita une énorme demande. À tel point que le verre devint usuel dans tout l'Empire romain.

Des siècles de dépendance

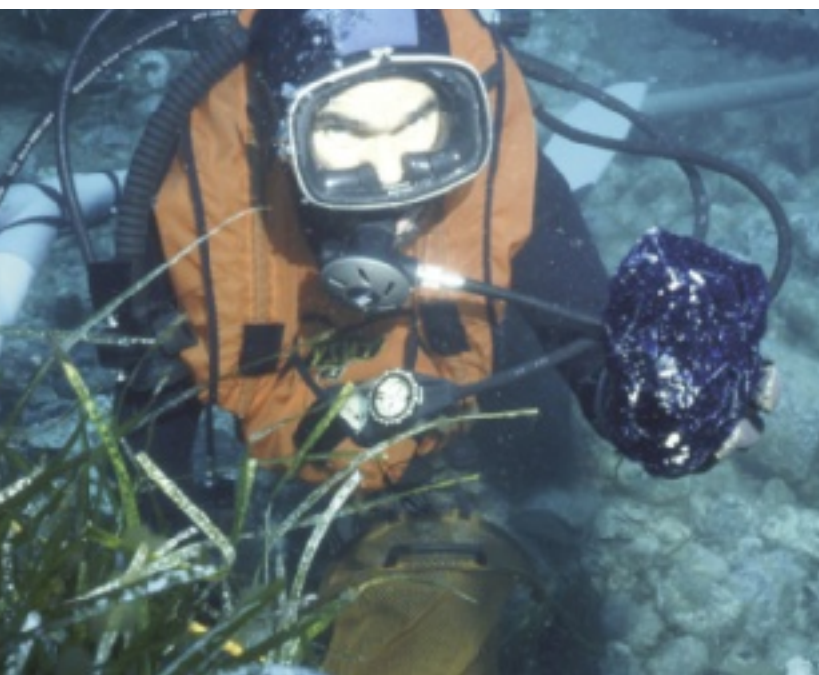
On a découvert récemment à quel point l'Occident antique dépendait de l'Orient pour l'approvisionnement en verre.

L'analyse chimique de nombreux verres romains retrouvés en Occident a montré que leur élaboration se faisait en deux phases, d'une part, la production du matériau brut dans des ateliers primaires localisés au Proche-Orient, et ensuite sa transformation en produits manufacturés dans des ateliers secondaires situés en Occident. Au cours de l'élaboration de leur verre, les stabilisants (chaux, alumine, magnésie...) étaient tous apportés par le sable ou par le natron. C'était le sable syro-palestinien qui convenait particulièrement bien à cause de sa teneur idéale en stabilisants, ce qui explique l'implantation des ateliers primaires de production de verre en Palestine. Nous le savons depuis que l'analyse chimique en laboratoire de nombreux verres romains trouvés en Occident a établi qu'ils ont tous été produits avec du sable issu de la côte syro-palestinienne, ce même sable dont les auteurs anciens vantaient la qualité.

Quant à l'autre ingrédient antique du verre, le natron, il s'agit d'un minéral naturel produit par l'évaporation de mares riches en sodium. Il est composé de carbonate de sodium

1. Ce bloc de verre brut (page ci-contre) se trouvait à bord d'un navire romain, qui coula près de l'île des Embiez au large de Toulon à la fin du II^e siècle. Incapables de produire la matière première, les verriers romains la faisaient venir du Proche-Orient, et la refondaient afin de produire divers objets usuels, telle cette amphore à décor moucheté du I^{er} siècle trouvée à Carpenedolo près de Brescia (ci-contre à droite).





Hervé Alfonsi / ARASM

2. L'un des plongeurs de l'Association pour la recherche archéologique sous-marine, en Corse, remonte un bloc de verre brut trouvé dans une épave d'époque hellénistique (III^e siècle avant notre ère) échouée dans la passe des Sanguinaires à l'entrée du golfe d'Ajaccio. Une demi-tonne de verre brut en lingots atteste de l'ancienneté du trafic de verre brut de l'Orient vers l'Occident.

hydraté ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ainsi que d'une roche évaporitique (produit par l'évaporation d'une mare chargée en sédiments) contenant du carbonate de sodium (NaCO_3) et surtout du bicarbonate de sodium (NaHCO_3). À l'époque romaine, on le trouve essentiellement dans les lacs du Wadi Natrun entre Le Caire et Alexandrie et c'est presque exclusivement le natron d'Égypte qui est utilisé.

Ainsi, pendant des siècles, les officines occidentales dépendent des centres de production orientaux, dépendance qui durera du III^e siècle avant notre ère à la fin du VII^e siècle ! Le verre que refondaient les artisans occidentaux provenait probablement en grande partie de Syrie-Palestine. Certes la région n'a pas encore livré d'atelier primaire d'époque impériale (à partir de la fin du I^{er} siècle avant notre ère), mais la découverte exceptionnelle de 17 fours primaires de la fin du VI^e ou du début du VII^e siècle, à Bet Eli'ezer près d'Hadera, en Israël, atteste d'une certaine tradition et permet de comprendre la fabrication du verre durant le I^{er} millénaire. Seules les parties inférieures des fours sont conservées. Ils étaient divisés en deux parties : la chambre de chauffe et la chambre de fusion. À l'avant sont placées deux chambres de chauffe tri-

3. Ces balsamaires trouvés à *Forum Julii* (actuelle Fréjus) contenaient des parfums. Au cours des premiers siècles de notre ère, de telles fioles furent produites par centaines de milliers, par exemple en Campanie dans la région du Vésuve, puis exportées dans tout l'Empire. Les Romains y mettaient leurs parfums, tant pour les cultes religieux que pour la toilette.



Service municipal d'archéologie, Fréjus

angulaires, tandis qu'une chambre de fusion rectangulaire (de deux mètres sur quatre) est située à l'arrière. Le sable et le natron devaient être déposés dans le bassin avant la fermeture de la voûte et avant l'allumage de feux dans les chambres de chauffe ; il fallait entretenir le feu pendant 10 à 15 jours. Cette durée de cuisson est encore celle qu'il faut aux actuels verriers traditionnels indiens, dont les procédés sont comparables à ceux des Romains. Le chauffage portait les matériaux à 1100 °C grâce au rayonnement des parois. Puis le verre produit au cours de la cuisson devait être refroidi rapidement à l'eau afin que ses composants ne recristallisent pas, au risque que le matériau ne perde son aspect homogène. Pour ce faire, les artisans démontaient la partie haute du four afin d'accéder à la dalle de verre de huit à neuf tonnes qui avait été produite à l'intérieur. Une fois refroidie, la dalle était attaquée à la masse afin d'obtenir des blocs transportables. Des installations similaires ont été découvertes en Israël, à Apollonia et à Bet She'arim. D'autres l'ont été en Égypte au cours des fouilles menées en 2005 dans le Wadi Natrun sous la direction de M.D. Nenna : il semble que dans certains fours à bassin, on produisait jusqu'à 16 tonnes de verre.

Longtemps, les énormes quantités de verre retrouvées à Pompéi et à Herculaneum en Campanie ont fait croire que des ateliers primaires existaient aussi dans la région du Vésuve. Cette possibilité semblait d'autant plus plausible que dans son *Histoire naturelle*, Plinius l'Ancien évoque le sable blanc verrier du fleuve Volturne entre Cumes et Litterne : « On recueille un sable blanc très tendre ; on le broie au mortier et à la meule ; ensuite on y mêle trois parties de nitre... Cette masse est mise en fusion, et elle donne du verre pur et des pains de verre blanc. » Cependant, les analyses des fragments de verre brut retrouvés et celles des objets de verre découverts à Pompéi ne font que confirmer l'origine syro-palestinienne du verre brut.

Le commerce du verre

Cette organisation antique de la production du verre engendrait tout un commerce transméditerranéen, sur lequel nous renseignent les épaves découvertes dans la *Mare Nostrum*. Fouillée par Hervé Alfonsi et les membres de son équipe de l'Association pour la recherche archéologique sous-marine, en Corse, une épave du III^e siècle avant notre ère prouve l'exportation de verre d'Orient en Occident dès l'époque hellénistique. Dans la passe des Sanguinaires, à la sortie du golfe d'Ajaccio, les plongeurs de l'association ont remonté plus de 550 kilogrammes de verre, sous la forme de fragments de lingots, mais aussi de restes d'objets manufacturés (voir la figure 2). Au large de la Croatie, le naufrage d'un bateau au I^{er} siècle nous renseigne sur la nature des cargaisons de verre à l'époque romaine : outre les habituelles amphores, il contenait une centaine de kilogrammes de blocs de verre bleu-vert. Avec les siècles, le volume des échanges verriers entre l'Orient et l'Occident n'a cessé d'augmenter, ce que confirment les épaves des II^e et IV^e siècles. Fouillée en 2003 par Marie-Pierre Jézégou du Département des recherches archéologiques