Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 83 (1985)

Heft: 8

Artikel: Sur l'implantation de grands ouvrages de l'antiquité

Autor: Kobold, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-232602

- Non-vertical geodesy; by M. Ozone. Diss. ETH, Nr. 3825, Zürich, Juris 1966.
- Studien über die Berechnung von Lotabweichungen aus Massen, Interpolation von Lotabweichungen und Geoidbestimmung in der Schweiz; von A. Elmiger. Diss. ETH, Nr. 4210, Zürich 1969.
- Zur Genauigkeit geodätischer Verschiebungsmessungen; von H. Aeschlimann. Diss. ETH, Nr. 4438, Zürich 1971.
- Contribution à l'étude des déviations de la verticale dans la région du Tessin et au Nord-Ouest de l'Italie; par Y. Wassouf. Diss. ETH, Nr. 5597, Zürich 1975.

Daneben wirkte Prof. Kobold bei über einem Dutzend weiterer Dissertationen, die hier nicht aufgeführt sind, als Korreferent.

Veröffentlichungen über Prof. Kobold

- Prof. Fritz Kobold sechzigjährig. Neue Zürcher Zeitung, 1965, 11. August, Nr. 3305.
- Prof. Dr. h. c. Fritz Kobold 60jährig. SZVKP, 63 (1965) S. 241–243.
- Zum Rücktritt von Prof. Dr. h. c. F. Kobold an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. VPK, 72 (1974) Mitteilungsblatt, S. 137–138 (von R. Conzett).
- Prof. Dr. Fritz Kobold im Ruhestand. ETH-Bulletin, 7 (1974) Nr. 90, S. 21–22.
- Prof. Fritz Kobold siebzigjährig. Neue Zürcher Zeitung, 1975, 12. August, Nr. 184, S. 35.
- Prof. Dr. h. c. Fritz Kobold 70jährig, VPK, 73 (1975) Mitteilungsblatt, S. 183 (von R. Conzett).
- Prof. Dr. F. Kobold zum 70. Geburtstag. VPK, 73 (1975) Fachblatt, S. 147–284.
- Prof. Dr. F. Kobold 70 Jahre. Zeitschrift für Vermessungswesen, 100 (1975) S. 424–425 (von H. Wolf).
- Em. Prof. Dr.-Ing. E. h. Fritz Kobold. In: Fünfundzwanzig Jahre Deutsche Geodätische Kommission. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe E, Heft Nr. 17, München 1978 (von Prof. Kobold selbst verfasst).
- Prof. Dr. h. c. Fritz Kobold zum 75. Geburtstag. VPK, 78 (1980) S. 346 (von R. Conzett).
- Zum Hinschied von Prof. Dr. h. c. Fritz Kobold. Neue Zürcher Zeitung, 1985, 29. April, Nr. 98, S. 33 (von R. Conzett).
- Zum Tode von Professor Fritz Kobold. Tages-Anzeiger, Zürich, 1985, 30. April (von F. Chaperon).
- Zum Hinschied von Prof. Dr. h. c. Fritz Kobold. VPK, 83 (1985) S. 245–250 (von R. Conzett).

Nachwort des Bearbeiters:
Für die wertvolle Unterstützung bei der Erstellung dieses Verzeichnisses sei Herrn Dr. B. Glaus von der Hauptbibliothek der ETH Zürich herzlich gedankt.
Professor Kobold schätzte es nicht, wenn viel Aufhebens von seinen Arbeiten gemacht wurde. So legte er denn auch keinen Wert auf ein Verzeichnis derselben. Die vorliegende Zusammenstellung stellt nun einen Versuch dar, mit dem etwas gezeigt werden möge, mit welchen Themenkreisen er sich im Laufe der Jahre befasst hat. Sie dürfte kaum vollständig sein; Ergänzungen aus dem Leserkreis sind deshalb sehr willkommen und werden erbeten an die

Adresse des Bearbeiters:
W. Fischer, Dipl. Ing.
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

Sur l'implantation de grands ouvrages de l'Antiquité

F. Kobold †

C'est en février de cette année que le regretté Professeur Fritz Kobold avait donné à Lausanne la conférence dont le texte est publié ci-dessous.
Monsieur Kobold en avait élaboré lui-même la version française, et avait sollicité notre aide pour la mise au point définitive du texte. A cette occasion, il avait exprimé le vœu que cette conférence, qui lui tenait beaucoup à cœur, puisse être publiée dans notre revue. Nous voudrions rendre hommage à sa mémoire en exécutant ce vœu.
Dans une première partie, l'auteur décrit les travaux d'implantation de la Grande pyramide de Chéops, et discute les diverses hypothèses qui ont présidé au choix de ses dimensions: utilisation par les Egyptiens du Triangle sacré, du nombre d'or, du nombre π?
Dans une deuxième partie, il commente l'implantation du Tunnel d'Eupalinos, dans l'île de Samos; le premier tunnel probablement que l'on ait creusé simultanément par les deux extrémités, 5 siècles av. J.-C.

Im Februar dieses Jahres hielt der verstorbene Professor Fritz Kobold in Lausanne diesen Vortrag.
Er hatte den französischen Text selber redigiert und den Unterzeichneten gebeten, ihm bei der Abfassung der endgültigen Fassung behilflich zu sein. Bei dieser Gelegenheit äusserte er auch, dass er den Vortrag gerne in unserer Zeitschrift publizieren möchte. Im treuen Andenken an ihn möchten wir diesen Wunsch gerne erfüllen.
In einem ersten Teil beschreibt der Autor die Absteckungsarbeiten beim Bau der grossen Cheopspyramide und diskutiert die verschiedenen Hypothesen, die zur Wahl von deren Dimensionen geführt haben könnten: Verwendung des heiligen Dreiecks, Anwendung des goldenen Schnittes oder Verwirklichung der Zahl π?
Im zweiten Teil kommentiert er die Vermessungsarbeiten für den Tunnel von Eupalinos auf der Insel Samos. Wahrscheinlich handelt es sich dabei um den ersten Tunnel mit beidseitigem Vortrieb im 5. Jahrhundert vor Christus.

H. Dupraz, Institut des Mensurations EPFL

On constate que l'homme a exécuté, il y a des millénaires, les premières mensurations au moment où il a commencé à bâtir et à construire; il est incontestable que pour chaque civilisation, la technique, y compris la mensuration, atteignait son point culminant à l'apogée de cette civilisation. Ce fut notamment le cas en Egypte et en Grèce. Certains disent avec raison que la mensuration d'un pays est un critère de sa culture générale.
Dans la littérature archéologique, nombreux sont les articles où les auteurs s'efforcent de décrire les procédés techniques appliqués pour la construction des anciens ouvrages. Il faut regretter qu'on n'y trouve que très peu de choses en ce qui concerne la mensuration et les travaux topographiques. Cette lacune s'explique par le fait que les travaux de mensuration étaient généralement plus faciles à exécuter que les travaux de construction. Afin de se faire une idée des procédés utilisés par les Anciens, on établit en général, aujourd'hui, un levé topographique

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich
Separata Nr. 91

détaillé des restes des anciens ouvrages. Malgré cela, comme dans la plupart des cas, plusieurs explications sont possibles, on ne peut pas garantir que celle retenue soit la meilleure, et encore moins que ce soit la vraie. En général, on se décide pour le procédé qui nous paraît être le plus simple. Mais en agissant ainsi, on oublie parfois qu'une méthode qui nous semble être la meilleure, était peut-être pour les Anciens plus difficile à mettre en œuvre qu'une autre qu'ils avaient trouvée empiriquement. Le principe de se décider pour la solution la plus simple est déjà discutable dans les sciences naturelles; il l'est encore davantage en archéologie.
On va présenter dans ce qui suit quelques méthodes de mensuration antique sur la base de deux exemples qui sont depuis plus d'un siècle l'objet de recherches fondamentales. Le premier est la grande pyramide de Gizeh, appelée pyramide de Chéops; le deuxième est un tunnel situé dans l'île de Samos et servant à une alimentation en eau. La littérature sur ces deux objets est très vaste et cette conférence ne peut en donner qu'un extrait condensé. On n'y trouvera donc presque rien de nouveau. L'auteur se contente d'ajouter deux ou trois fois son opinion.

La pyramide de Chéops

D'après Hérodote, cette pyramide est l'une des Sept Merveilles du Monde; sa renommée vient de sa grandeur extraordinaire et de son esthétique sans pareil. Elle est appelée aussi ‹la Grande› (Fig. 1), ses dimensions dépassant celles des deux autres pyramides de Gizeh. Les pyramides furent érigées comme tombeaux et temples pour le pharaon, considéré à la fois comme souverain temporel et comme incarnation du Dieu-Soleil. D'après le savoir moderne, ce n'étaient pas des esclaves qui construisaient les pyramides, mais des citoyens qui y travaillaient pendant des années, motivés par leur religion. C'est elle seule qui explique que 10 000, voire 20 000 hommes s'efforcèrent pendant une vingtaine d'années de construire une pyramide dont la base carrée atteignait 230 m et la hauteur 146 m, ce qui exigea 6 millions de tonnes de pierres.
Chéops fut pharaon de 2551 jusqu'à 2528 av. J.C., et c'est pendant ces années que la grande pyramide a dû être construite. Il s'est donc écoulé environ quatre mille cinq cents ans depuis la construction de ce monument qui domine l'Egypte. Mais il n'existe ni inscription, ni papyrus parlant de cette réalisation, et en particulier des procédés appliqués lors de cette construction, qui représente à elle seule un miracle.

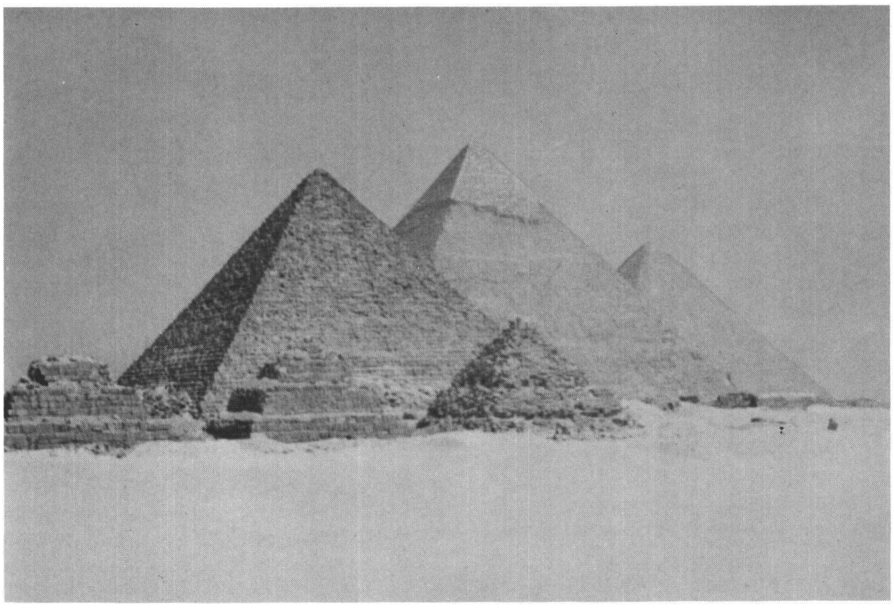

Fig. 1 Les 3 pyramides de Gizeh. La Grande pyramide ou pyramide de Chéops.

‹Muet, sans proférer un mot, mais parfait dans son caractère, ce monument se trouve au seuil de l'histoire humaine et nous nous demandons encore aujourd'hui quel était son but et son sens, comme le faisait l'écrivain grec Hérodote, il y a deux mille ans. Il s'agit d'un cas singulier, inexplicable dans toute l'histoire culturelle, puisque parmi toute la série de monuments qui caractérisent une période historique et un style, le plus grandiose et le plus parfait de son genre est aussi le premier et le plus vieux, et que tous ceux qui ont suivi ne font qu'illustrer la décadence progressive de ce génie créateur. Dans tous les autres styles de construction, nous voyons l'évolution progressive de l'idée fondamentale vers des formes toujours plus grandes et plus parfaites, jusqu'à l'apogée. Des siècles ont été nécessaires pour que les colonnades de l'Egypte et de l'Asie mineure trouvent leur perfection dans les temples grecs, ou que les premiers arcs brisés des mosquées arabes s'achèvent dans la cathédrale de Cologne ou celle d'Ulm, dans une évolution que l'on peut suivre pas à pas. C'est le contraire qui est arrivé pour la Grande pyramide. Rien ne nous montre la naissance d'un art de construire de l'ancienne Egypte, dont on trouverait l'aboutissement dans la pyramide de Chéops. Gigantesque et parfait du point de vue technique, ce monument se tient au début de l'histoire de son peuple, comme né de rien et demeuré à jamais inégalable.›
Ces mots, un peu emphatiques mais typiques du style des années 1900, se trouvent dans un livre dont on pourrait traduire le titre par ‹La querelle autour de la pyramide de Chéops›, livre qui avait enthousiasmé les collégiens de cette époque. Si l'auteur du livre parle de querelle, c'est que les égyptologues ne s'accordaient pas sur la question de savoir s'il fallait voir une signification mystique ou non dans les rapports et les dimensions de la Grande pyramide.

La base carrée horizontale de la Grande pyramide

Les travaux de mensuration en vue de la construction de la Grande pyramide ont certainement commencé par l'implantation du carré de base. Il va de soi qu'ensuite on construisait étage par étage et qu'il fallait rendre les surfaces aussi horizontales que possible, ce qui pouvait être fait à l'aide de l'équerre munie d'un fil à plomb (Fig. 2). Aux bords de ces étages, on traçait l'angle d'inclinaison des faces latérales avec des calibres de maçon ou de charpentier. Ces opérations se répétaient jusqu'au sommet de la pyramide. En ce qui concerne l'angle d'inclinaison, il pouvait être défini directement, peut-être empiriquement; ou bien on pouvait le déterminer en fixant la hauteur et la base de la pyramide.
Le levé le plus récent et le plus précis de la Grande pyramide est dû à l'initiative de l'égyptologue allemand Borchardt. Il fut exécuté en 1921 par le

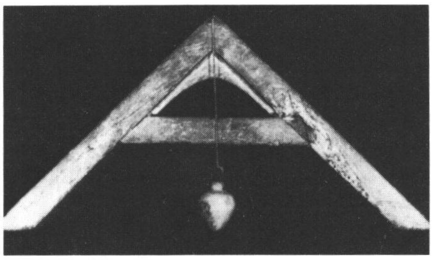

Fig. 2 Equerre munie d'un fil à plomb (Musée archéologique, Le Caire).

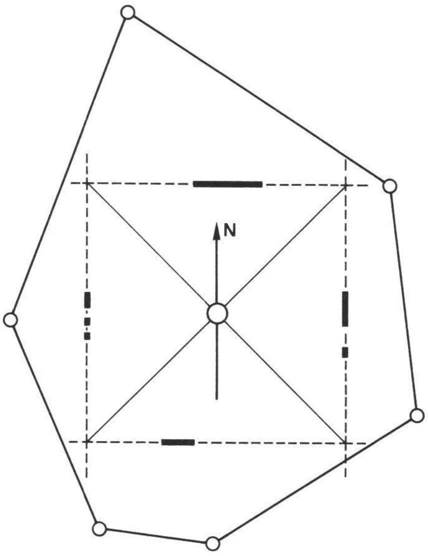

Fig. 3 Cheminement polygonal effectué en 1921 par le Survey of Egypt autour de la Grande pyramide. On y distingue les traces conservées des côtés de la base.

Survey of Egypt et consiste en un cheminement polygonal autour de la pyramide (Fig. 3). Pour la détermination des longueurs et des directions des quatre côtés du carré, on chercha les points d'intersection de ces côtés avec les côtés du cheminement. Les distances du cheminement furent mesurées avec des fils en invar et les angles avec des théodolites à microscope. Les petites erreurs de fermeture prouvent la haute qualité du cheminement.

Les *altitudes* des points du cheminement et celles de nombreux points sur la pyramide furent déterminées par un nivellement de précision. Avant de construire la pyramide, les Egyptiens avaient créé une surface plane et horizontale dans le rocher, et sur cette surface ils avaient réalisé une couche de plâtre. Des points de nivellement, qui existent encore sur les quatre côtés de cette surface rocheuse, renseignent sur la précision obtenue il y a 4500 ans. On y trouve:

Côté Nord	3 points	Alt. moyenne	60,410 m
Côté Est	1 point	Alt. moyenne	60,413 m
Côté Sud	3 points	Alt. moyenne	60,422 m
Côté Ouest	2 points	Alt. moyenne	60,414 m

Table 1

La différence maximale se présente entre les côtés Nord et Sud et atteint 12 mm, une très petite valeur pour la longueur totale de 920 m du nivellement. On présume que les altitudes furent déterminées au moyen d'une latte qu'on rendait horizontale à l'aide d'une équerre munie d'un fil à plomb, comme on l'a déjà indiqué. La précision indiquée pouvait sans doute être atteinte par ce procédé. D'autres archéologues, eux, sont d'avis que les Egyptiens avaient creusé un canal rempli d'eau autour de la pyramide et mesuré les différences de niveau entre les points de la pyramide et l'eau. Il va sans dire que ce dernier procédé est plus précis que le premier. Quant à l'objection qu'on devrait trouver des restes d'une telle conduite, on peut répondre que le canal n'était probablement pas construit en pierre et qu'il n'a pas résisté à l'usure des siècles.

Longueurs des côtés du carré horizontal

Un piquetage précis servait de base pour graver les quatre côtés du carré dans la couche de plâtre. Différentes portions (de 26 à 58 m) de ces lignes gravées sont conservées et permettent de trouver les directions des côtés (Fig. 3). Leur précision augmente avec la longueur des traces conservées. Mais elle dépend aussi de la qualité de ces traces. En conséquence de cela, le carré reconstitué ne peut pas être très précis. La table 2 donne les longueurs des côtés en mètres et celles des angles du carré en gons, trouvés par calcul:

Côté Nord	230,253 m	coin NE	$100^g + 5{,}6^c$
Côté Est	,391 m	coin NE	$100^g - 6{,}6$
Côté Sud	,454 m	coin NE	$100^g + 1{,}0$
Côté Ouest	,357 m	coin NE	$100^g - 0{,}1$
Moyenne des côtés Est et Ouest		230,374 m	
Moyenne des côtés Nord et Sud		230,354 m	

Table 2

Dans la littérature, ces résultats sont considérés comme tout à fait remarquables. Nous n'en sommes pas convaincus, car si l'on regarde ces chiffres de plus près, on constate d'abord que les longueurs des côtés Est et Ouest ne diffèrent que de 34 mm et que leur moyenne est de 230,374 mètres. Par contre, la différence entre les côtés Nord et Sud est de 201 mm; leur moyenne de 230,354 mètres est toutefois à 20 mm près de la moyenne des côtés Est et Ouest. Il s'ensuit de la table 2 et de la figure 4 que si l'on corrige la direction du côté Est de 6^c, les quatre côtés obtiennent à peu près la même longueur; et déjà avec une correction de 3^c on obtiendrait des côtés Nord et

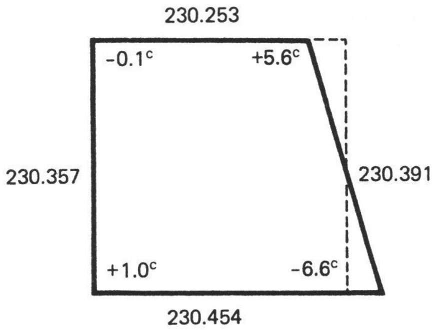

Fig. 4 Longueur des côtés et écarts angulaires du carré de base de la Grande pyramide.

Sud qui ne différeraient plus que de 100 mm. La question est de savoir si une erreur de 3^c ou même de 6^c sur la direction du côté Est est imaginable. En se souvenant que la détermination des côtés du carré de base s'appuie sur des portions du tracé retrouvé et que ces portions étaient courtes et quelquefois incertaines, on peut répondre affirmativement. Il existe encore une autre explication pour cette erreur de direction. D'après des recherches d'égyptologues italiens, la face Est de la pyramide n'était pas une surface plane, mais plutôt une surface concave, dans laquelle on pouvait lire l'heure à l'aide de l'ombre. Si donc les restes des traces utilisées appartenaient à cette surface courbe, des déviations de 6^c seraient sans autre façon explicables. Ces deux explications restent ouvertes à cause de l'incertitude sur le traçage du côté Est; la précision de l'implantation de cette base carrée, de l'ordre de quelques centimètres, reste par conséquent un résultat étonnant.

En relation avec cette précision surprenante, la question se pose de savoir quelles étaient les méthodes de mesurage des anciens Egyptiens. La plupart des égyptologues admettent qu'à l'époque de la construction de la Grande pyramide, il n'existait pas d'instruments pour reporter des angles droits dans le terrain, et qu'on n'a connu de tels appareils qu'aux époques grecque et romaine. On peut douter de cette affirmation. En effet, si les Egyptiens étaient capables de bâtir des monuments comme les pyramides, pourquoi n'auraient-ils pas su construire un appareil permettant de piqueter des angles droits? Si, malgré cela, on s'appuie sur la supposition qu'un tel instrument n'existait pas, le piquetage du carré a dû être exécuté à l'aide de mesures de distances. La littérature des Anciens nous donne assez d'informations sur l'activité des *harpedonaptes* (mot grec qu'on pourrait traduire par ‹tendeurs de cordes›). Ils jouissaient dans l'ancienne Egypte d'une réputation considérable et l'on sait qu'ils connaissaient les causes de la variation des longueurs des cordes, comme la température, l'humidité et naturellement la tension. Par contre, le grand philosophe grec Platon ne trouve que des paroles de mépris pour ces tendeurs de cordes qui n'exerçaient que du travail pratique. Pour lui, seuls les géomètres grecs méritaient la renommée parce qu'eux seuls avaient découvert les bases de la géométrie et des mathématiques.

Admettons que ces ‹tendeurs de cordes› étaient seulement capables de mesurer des distances; on suppose que pour construire et piqueter le carré, ils ont d'abord construit le triangle équilatéral ABC. Partant des points A et B, on trouvait ensuite le point C comme point commun aux deux cercles de centre A et B et de rayon AB. Vu la grandeur du rayon AB, il fallait donc travailler par approximation, ce qui exigeait un travail très soigneux. Partant du triangle ABC, on pouvait construire de la même manière les points D et E. Si, par exception, on désirait des angles droits, on se servait du triangle sacré des Egyptiens: le triangle dont les côtés sont 3, 4 et 5.

Orientation

On savait depuis longtemps que l'orientation des pyramides n'était pas quelconque et c'est pourquoi en 1921, le Survey of Egypt détermina aussi l'azimut d'un côté par des observations de l'étoile polaire. Il trouva une déviation de 4,6^c du côté Ouest par rapport à la direction du Nord, ce qui est remarquable, et on s'interroge aujourd'hui sur la méthode employée autrefois. On admet généralement que les anciens Egyptiens se sont servis de la méthode des hauteurs correspondantes du soleil et des étoiles, profitant aussi de l'observation des levers et des couchers. D'après la littérature, on employait un instrument nommé Merchet, une espèce de dioptre, reproduit dans la figure 5. On peut se demander si les Egyptiens ne disposaient pas d'instruments plus perfectionnés, ce qui expliquerait mieux la haute précision atteinte. Hasard ou non, il est d'ailleurs frappant qu'à la même époque, mais dans d'autre pays très éloignés, comme à Stonehenge en Angleterre, on ait érigé des cercles de menhirs orientés d'après les directions astronomiques. Pour revenir à la pyramide de Chéops, ce ne sont pas seulement les côtés qui sont orientés d'après les directions astronomiques. On remarque, par exemple, que le couloir d'accès à la chambre funéraire correspond à la direction du pôle boréal (Fig. 6). Pour la construction de la pyramide, on ne s'est d'ailleurs servi de l'étoile polaire qu'au début des travaux. Par la suite, on utilisait un point de repère placé dans la direction du Nord à une distance de 40 km. De tels repères furent aussi retrouvés pour les autres pyramides.

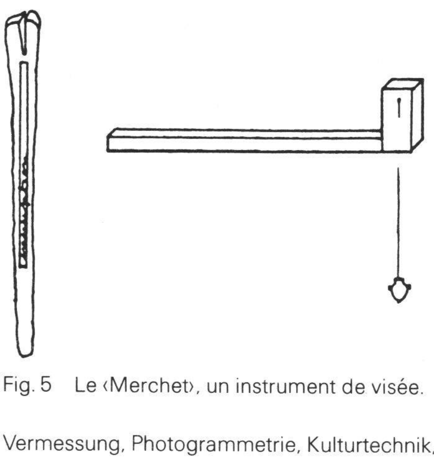

Fig. 5 Le ‹Merchet›, un instrument de visée.

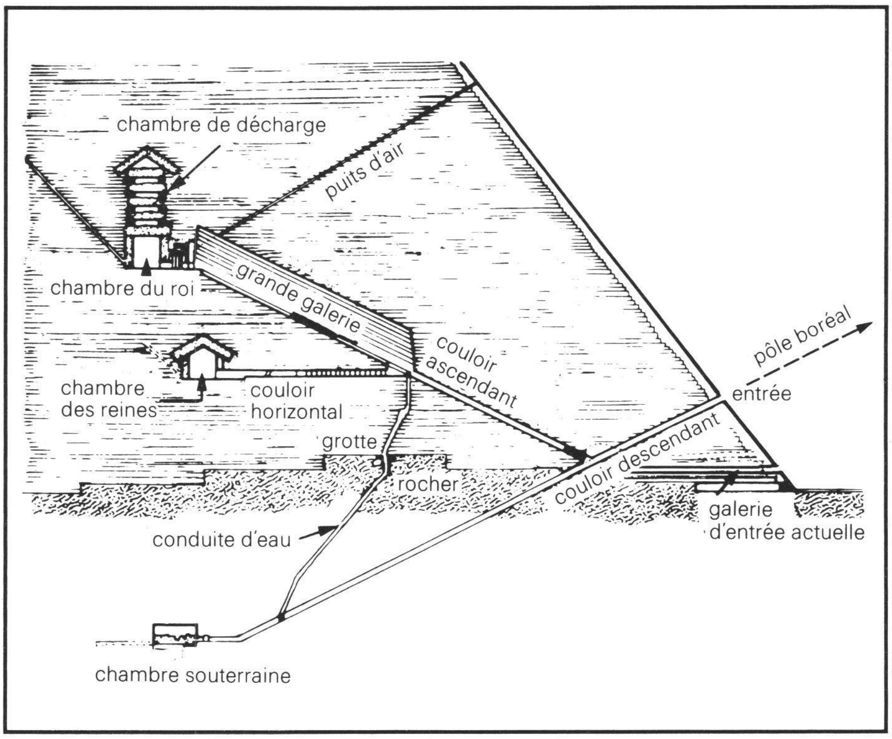

Fig. 6 Coupe verticale partielle de la Grande pyramide, avec l'orientation vers le Pôle boréal du couloir d'accès à la chambre funéraire.

La pente des quatre faces latérales de la Grande pyramide

Les auteurs qui décrivent leur émotion esthétique devant la pyramide de Chéops expliquent cette impression de beauté par la relation entre les côtés et la hauteur de la pyramide, c'est-à-dire l'angle d'inclinaison des quatre faces latérales. Certes, à l'œil nu déjà, on peut constater que la pente est supérieure à 1/1, mais inférieure à 3/2, de manière que l'angle d'inclinaison est à peu près 60^g. C'est cet angle qui a donné lieu à des discussions presque ininterrompues depuis 1860 jusqu'à nos jours, entraînant des spéculations d'abord scientifiques, puis de plus en plus fantaisistes. Sans entrer dans les détails, les lignes suivantes donnent un aperçu très condensé de quatre hypothèses.

Au milieu du 19^e siècle, l'un des principaux chercheurs dans le domaine des pyramides était un Anglais nommé Piazzi Smyth, astronome du roi, en Ecosse.

Les mesures disponibles à cette époque donnaient les dimensions en pieds anglais qu'on a pu convertir en aunes égyptiennes à l'aide des étalons découverts (Fig. 7). Remarquons cependant que les valeurs de la Grande pyra-

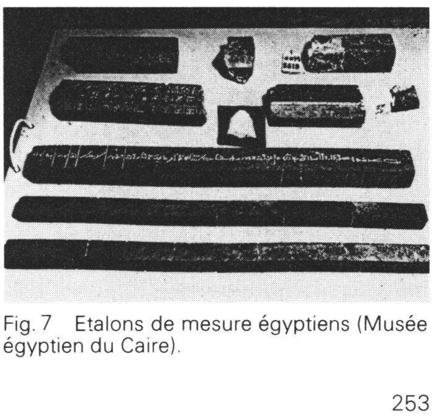

Fig. 7 Etalons de mesure égyptiens (Musée égyptien du Caire).

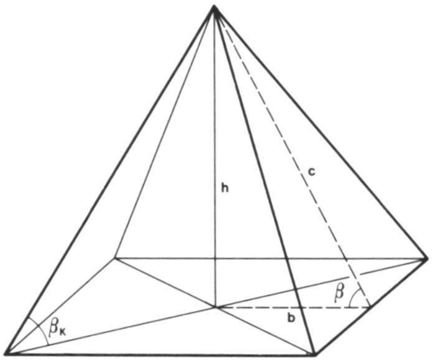

Fig. 8 Rapports entre les angles et les côtés de la Grande pyramide.

mide dont Piazzi Smyth disposait ne diffèrent que de peu des valeurs modernes du Survey of Egypt. En accord avec d'autres égyptologues, Smyth trouvait 440 aunes égyptiennes pour la longueur des côtés et 280 pour la hauteur. Ces valeurs donnaient grande satisfaction parce qu'on admettait que les anciens Egyptiens s'étaient servis seulement de chiffres ronds. D'après la figure 8, on trouvait:

$$\begin{aligned} \text{tg}\ \beta &= h/b = 280/220 = 1{,}27273 \\ \text{cotg}\ \beta &= b/h = 11/\ 14 = 0{,}78571 \\ \beta &= 57{,}603\ \text{gon} \end{aligned}$$

L'angle d'inclinaison β pouvait être déterminé aussi d'une autre manière. A l'origine, les faces latérales étaient aplanies par des pierres taillées avec un soin extraordinaire. Smyth en a retrouvé quelques-unes. En mesurant ces pierres, il a trouvé β = 57,615 gon, un très bon accord donc avec le β dérivé des dimensions de la pyramide. A l'époque de Smyth, on cherchait des rapports entre les nombres; quelques égyptologues et Smyth avaient eu l'idée peut-être un peu bizarre de multiplier ces valeurs b/h par 4, et ils trouvèrent 3,14268 et 3,14165, donc des nombres très proches du nombre π. Ce fait est la base de la première hypothèse.

Première hypothèse

A cause de ces relations numériques, les archéologues du milieu du 19e siècle émirent l'hypothèse que la pente des faces latérales de la pyramide résultait de la condition que la somme des quatre côtés horizontaux divisée par la double hauteur devait être égale à π. Mais très vite s'exprimèrent des doutes sur la validité de cette hypothèse qui supposait que les Egyptiens connaissaient le nombre π. Car malheureusement, il n'y a aucun point d'appui pour vérifier cette supposition. Dans les papyrus où l'on parle de la construction et du calcul des pyramides, papyrus bien plus récents que les pyramides d'ailleurs, on cherche en vain le nombre π. Pour déterminer la surface d'un cercle, on y recommande de calculer un carré dont les côtés sont d'un neuvième plus courts que le diamètre. A cause de cela, on est aujourd'hui d'avis que les anciens Egyptiens ne connaissaient pas le nombre π. Mais il y a aussi une opinion contraire: on sait que c'étaient des prêtres qui étaient chargés du projet, du calcul et des mensurations fondamentales des pyramides, tandis que les ‹tendeurs de corde› s'occupaient plutôt des mensurations de détail. Peut-on en tirer la conclusion, comme le font quelques archéologues, que les prêtres possédaient des notions spéciales, comme celle du nombre π, qu'ils gardaient secrètes? Il va de soi qu'on ne peut pas exclure cette hypothèse. La connaissance de π aurait alors été perdue au cours des siècles.

Deuxième hypothèse

Déjà vers la fin du 19e siècle, la première hypothèse fut mise en doute et remplacée par une deuxième, celle du *nombre d'or*, qui correspondait plus au goût de l'époque, où l'on cherchait à appliquer ce nombre dans les constructions nouvelles et à le retrouver dans les édifices des Anciens. Et en effet, on en a trouvé confirmation dans la Grande pyramide. Cette hypothèse exige que le rapport entre le demi-côté b et la hauteur h soit le même que celui entre le côté c et la hauteur h, ou bien $bc = h^2$. Combiné avec $b^2 + h^2 = c^2$, on obtient:

$$b/h = h/c = \sqrt{\frac{\sqrt{5}-1}{2}} = 0{,}78615$$

d'où β = 57,586 gon, et

b/c = 0,61803 et c/b = 1,61803

L'angle d'inclinaison β ne diffère que de 0,17 gon de l'angle qu'on avait trouvé d'après la première hypothèse. Il n'est donc pas possible de décider si les Egyptiens s'étaient basés sur le nombre π ou sur le nombre d'or. Si quelques chercheurs refusaient la deuxième hypothèse, c'était qu'elle exigeait la connaissance du nombre d'or. Ces chercheurs étaient d'avis que ce nombre était aussi peu connu que le nombre π. D'autre part, il faut se rendre compte que ce nombre d'or était plus facile à déterminer empiriquement que le nombre π.

Troisième hypothèse

Elle est basée sur le triangle rectangle avec les côtés de 220 et 280 aunes égyptiennes, d'où il résulte une hypothèse de 356,0899 aunes égyptiennes. Cette valeur est si proche de 356 qu'on peut imaginer que pour les Egyptiens, le triangle avec des côtés de 220, 280 et 356 aunes était pratiquement un triangle rectangle, voire même considéré comme un triangle sacré, comme celui avec les côtés 3, 4 et 5. En effet, ce triangle a les angles de 42,409, 57,624 et 99,967 gon. La différence du dernier angle par rapport à l'angle droit n'est que de 33 mgon et l'angle 57,624 gon est à 8 mgon près identique à l'angle d'inclinaison d'après l'hypothèse du π. Les partisans de la troisième hypothèse font ressortir que les anciens Egyptiens ont toujours recherché avec acharnement des relations entre les nombres, avec un goût particulier pour les interprétations mystiques, goût qui reste très vivant de nos jours.

Le rapport de 356/220 égal à 89/55 résulte d'ailleurs aussi des coefficients de Fibonacci

1 1 2 3 5 8 13 21 34 55 89 144 233 377 . . .

si on forme les quotients de coefficients consécutifs; et l'on sait que ces quotients s'approchent de plus en plus du nombre d'or.

En tirer la conclusion qu'à l'époque de la construction de la grande pyramide, on connaissait déjà les coefficients de Fibonacci, comme le font quelques égyptologues, est certainement exagéré. Il ne faut pas oublier que ce fameux mathématicien italien, le premier Européen qui se soit occupé, après les Arabes, de cette science, a vécu de 1180 à 1250 apr. J. C., c'est-à-dire presque quatre mille ans après la construction de la Grande pyramide.

La troisième hypothèse donne donc, si on s'appuie sur les valeurs approximatives de 89/55 pour le rapport c/b, exactement *le même résultat* pour la pente *que la deuxième*, c'est-à-dire un rapport *de 14/11* pour la hauteur et le demi-côté b. *Mais plus étonnant* encore est le fait que le *résultat de la première hypothèse est identique* à ceux de la *deuxième et de la troisième*, si on introduit pour π la valeur approchée de 22/7, connue depuis Archimède. En effet, on obtient

$4/\pi \cong 4 : 22/7 = 28/22 = 14/11$.

Quatrième hypothèse

Elle est la plus récente et se trouve dans l'excellent livre de Kurt Mendelssohn sur les énigmes des pyramides, paru pour la première fois en 1974.

Après avoir acquis une réputation éminente comme physicien – il a notamment réussi à liquéfier l'hélium – l'auteur s'est tourné vers l'archéologie, en particulier vers celle de l'ancienne Egypte, et dans ce domaine, il a fait des découvertes étonnantes. Il a trouvé des explications plausibles sur la construction des pyramides, et comme physicien, il réussit à trouver des raisons à la chute de quelques pyramides, des raisons plus convaincantes que ce qu'on avait trouvé jusque-là.

En ce qui concerne l'inclinaison des faces de la pyramide, il écrit que d'après l'idée d'un ingénieur électronicien nommé Conolly, les anciens Egyptiens se seraient servis d'une latte verticale, où l'unité de division était de quatre, pour déterminer la hauteur, tandis que pour mesurer les distances horizontales, ils faisaient dérouler un cylindre d'un diamètre d'une aune, de manière que la longueur horizontale après une révolution était π en aunes (Fig. 9). Cette explication est sans doute la plus simple, et les géodésiens ne

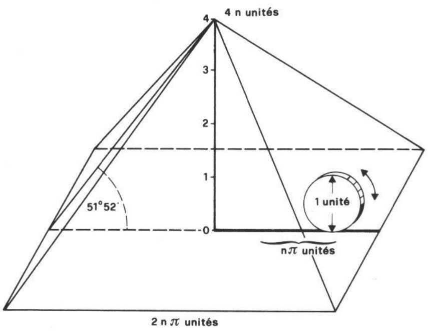

Fig. 9 La quatrième hypothèse: la hauteur est déterminée par 4n fois une certaine unité de longueur; la base, par révolutions d'un cylindre ayant cette unité pour diamètre, ce qui donne n·π unités.

sont guère fiers qu'un électronicien leur ait montré le procédé le plus commode des anciens Egyptiens! Malgré cela, il ne faut pas oublier, on l'a dit déjà, qu'un procédé qui nous paraît efficace ne l'était peut-être pas pour les Anciens.

Avant de discuter ces hypothèses, il faut encore ajouter que l'angle d'inclinaison des quatre arêtes varie entre 0,89950 et 0,90032 selon l'une ou l'autre hypothèse. La différence est seulement de 0,00082 ou de 0,82 pour mille. On pouvait donc déterminer cette inclinaison à l'aide d'une équerre dont les côtés étaient dans le rapport 10/9. Cette inclinaison de 10/9 pour les arêtes permettait sans doute la vérification d'une implantation correcte.

Si l'on essaie de se faire une idée d'ensemble des quatre hypothèses, on constate d'abord qu'aucun auteur n'est d'avis que les anciens Egyptiens ont trouvé l'angle d'inclinaison par des réflexions statiques ou par des essais, mais qu'ils possédaient déjà une certaine expérience. Mais aucun de ces auteurs ne dit que cet angle fut trouvé par un hasard quelconque. On est plutôt persuadé que les anciens Egyptiens ont choisi cette inclinaison sur la base d'une suite d'idées.

Il y a plusieurs raisons pour supposer que les anciens prêtres se soient servis de la quatrième méthode; la meilleure en est que l'exécution technique était très facile et qu'on obtenait directement la pente de 4/π sans avoir besoin du nombre π. Parmi les autres hypothèses, il semble que la première puisse être abandonnée parce qu'elle exigeait la connaissance de π, et encore fallait-il diviser le nombre quatre par ce nombre π. Mais l'argument le plus convaincant contre cette hypothèse vient surtout de ce qu'il paraît très peu probable qu'on ait cherché le quotient entre quatre fois le côté, divisé par le double de la hauteur. Restent par conséquent les hypothèses deux et trois. La deuxième repose sur la supposition que les anciens Egyptiens connaissaient le nombre d'or ou bien l'approximation de 89/55, ce qui ne paraît pas impossible. Mais comme ce nombre présentait sans doute des difficultés, les auteurs, qui soulignent le caractère religieux des pyramides, préfèrent la troisième hypothèse et sont d'avis que le quotient 89/55 provient uniquement du grand triangle sacré des Egyptiens.

Les pyramides en général, et celle de Chéops en particulier, représentent des exemples impressionnants du savoir technique des Egyptiens, y compris dans le domaine des mensurations. Il ne fait aucun doute que la connaissance et la pratique de la mensuration étaient plus développées qu'on ne l'imagine aujourd'hui encore. Le présent exposé est forcément limité: on aurait dû parler aussi des chambres et des couloirs à l'intérieur de la pyramide. Mentionnons au moins que les longueurs, largeurs et hauteurs de ces chambres sont à quelques centimètres près des multiples entiers de l'aune égyptienne et que, on l'a déjà dit, le grand couloir qui mène à l'intérieur est orienté vers le pôle nord céleste.

Aspects fantastiques et mystiques

Les dimensions de la Grande pyramide et les inclinaisons des faces latérales qui en résultent sont quelque chose de bien réel. A côté de cela, on trouve dans la littérature beaucoup de théories invérifiables, voire fantaisistes. Il ne vaut pas la peine d'en discuter, mais il faut au moins les mentionner. Ces textes ont été publiés par des générations de savants, (ou de gens croyant l'être!) et qui prétendent avoir trouvé des relations entre la densité de la terre, le diamètre du soleil, la distance entre le soleil et la terre, les orbites des planètes ou même la périodicité de la vie humaine, et les dimensions de la pyramide. Il paraît presque comique que l'astronome Piazzi Smyth, que nous avons déjà cité, et l'un des premiers à s'être occupé de ces questions, se soit laissé convaincre par ces élucubrations. Voici pourtant un détail important: Smyth avait trouvé par calcul, en se basant sur l'aune égyptienne, que le pouce égyptien était la cinq-cent-millonième partie de l'axe de rotation de la terre, et il avait constaté que ce pouce égyptien avait, à un millième près, la même longueur que le pouce anglais. Au surplus, s'il divisait la somme des quatre côtés du carré horizontal par 365,242, le nombre de jours de l'année tropique, et encore par 100, il obtenait de nouveau le pouce égyptien ou anglais. Ces faits étaient, pour Piazzi Smyth, astronome réputé, calviniste convaincu et anglican, adversaire de tout ce qui était français, une preuve que le système anglais de mesures était bien supérieur au système métrique!

Il semble incroyable qu'il ait réussi à convaincre le célèbre astronome Herschel de ses idées. Celui-ci avait quitté la Standard-Commission, chargée de l'étude des unités de longueurs, poids, etc. parce qu'elle recommandait d'adopter le système métrique. Plus tard, Herschel insista de nouveau avec succès pour qu'on garde le système anglais. Sans doute, ses démarches étaient-elles une conséquence de l'influence que Smyth avait exercée sur lui. Plus de cent ans sont écoulés depuis la parution du livre de Smyth, et un peu moins depuis l'intervention de Herschel. On peut se demander s'il fallait revenir à ces faits. Oui, si l'on songe que la publication de livres dans lesquels les énigmes des pyramides sont résolues à l'aide d'images trompeuses et de théories sans fondement n'a pas cessé, bien au contraire. Nombreux sont les livres où l'on cherche à prouver que des phénomènes de la nature ont trouvé une interprétation humaine dans les pyramides, et vice-versa. Il faut reconnaître qu'il est bien compréhensible de chercher à expliquer ce que nous rencontrons chaque jour. Mais ces spéculations sans vérification devraient trouver leurs limites dès que les auteurs s'aventurent au-delà de tout ce qui nous semble logique. Il va de soi que les représentants des sciences naturelles et les ingénieurs, habitués à appliquer les règles de la logique et des mathématiques, se refusent à accepter les idées de ces ‹charlatans›, comme ils les appellent. Leur scepticisme paraît quelquefois peut-être exagéré, mais il est motivé par le fait que dans ces livres peu sérieux, on trouve même des exposés sur les relations entre les pyramides et la vie humaine d'aujourd'hui; entre les pyramides, le passé et le futur. Ces fantaisies sont à rejeter. Il est étonnant que dans une période comme la nôtre, où le progrès des sciences naturelles est incontestable, de tels livres soient plus recherchés que les livres scientifiques. La raison en est peut-être le désir humain de descendre parfois en soi-même en s'occupant d'autre chose que des affaires quotidiennes.

Le tunnel d'Eupalinos sur l'île de Samos

Samos

Samos, une île grecque proche des côtes d'Asie mineure, connue aujourd'hui par ses vins et davantage encore par ses plages le long de la mer Egée, était au sixième siècle av. J.C. un centre spirituel et culturel, dont les habitants, selon l'écrivain grec Hérodote, ont construit les ouvrages les plus remarquables de la Grèce. Parmi ces ouvrages, il mentionne en particulier le tunnel servant comme conduite d'eau à travers la montagne. Si l'on sait qu'on a percé ce tunnel de 1040 mètres en attaquant simultanément par les deux extrémités, il devient évident que la construction d'un tel ouvrage n'était possible qu'à l'aide de notions mathématiques et géométriques. Et où aurait-on disposé davantage de ce savoir qu'à Samos? Car c'est dans cette île ou dans ses environs, à Milet, en Asie mineure, que vivaient au 6e siècle Thales l'astronome, mathématicien, philosophe et homme d'Etat; Anaximandre, son successeur, mathématicien et philosophe, ainsi que Pythagore, mathématicien, fondateur d'un conservatoire et d'une école de philosophie.

Le tunnel

Entre les années 570 et 522, l'île et la ville de Samos étaient sous la domination du tyran Polycrate qui réussit à mettre sur pied la plus forte puissance maritime de la Méditerranée et la plus grande flotte marchande, grâce à quoi cette ville devint l'une des métropoles de cette époque. Un problème posé par l'accroissement de la ville était l'adduction de l'eau. Il s'agissait de conduire l'eau d'une source qui se trouvait en dehors des murs d'enceinte (Fig. 10) jusqu'au centre de la ville. Deux solutions se présentaient. Ou bien on construisait un canal presque horizontal tout autour de la montagne (235 m), puisque la source et le centre de la ville avaient à peu près la même altitude; cette solution présentait l'inconvénient que la conduite se trouvait en dehors des murs, de sorte qu'elle pouvait facilement être détruite en cas de guerre. Ou bien on perçait un tunnel à travers la montagne. Si l'on s'est finalement décidé pour cette deuxième solution, c'est sans doute pour des raisons de nature militaire. Elle garantissait une certaine inviolabilité, fait très important dans une période où les guerres se succédaient. La particularité la plus étonnante de ce tunnel est que sa construction fut entreprise simultanément par les deux portails, l'entrée au nord et la sortie au sud, et on a des raisons de penser que ce procédé fut tenté ici, dans l'île de Samos, pour la première fois dans l'histoire humaine.

Les noms de beaucoup d'hommes politiques, de généraux, de philosophes et de poètes de l'antiquité ont été transmis jusqu'à nos jours. Ce n'est pas le cas pour les ingénieurs. Il y a peu d'exceptions à cela et précisément le tunnel de Samos en est une. L'ingénieur chargé de sa construction s'appelait Eupalinos. Un nom qui n'est pas inconnu parce que le poète français Paul Valéry l'a choisi comme titre d'une de ses pièces, où l'on voit Socrate et Phèdre se disputer sur l'activité de l'architecte, personnifié par Eupalinos, constructeur de temples.

La construction de l'adduction d'eau dans l'île de Samos, adduction compo-

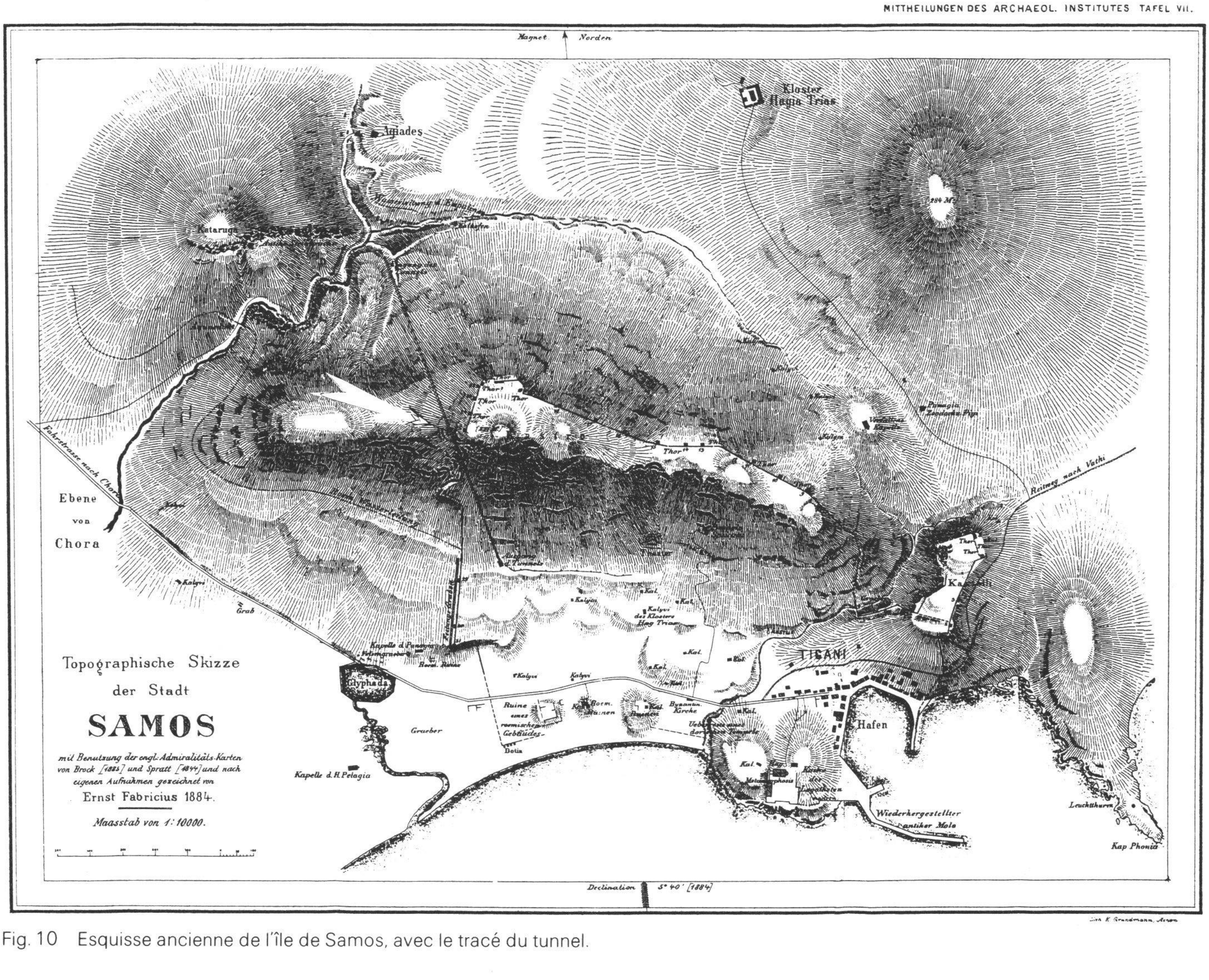

Fig. 10 Esquisse ancienne de l'île de Samos, avec le tracé du tunnel.

sée d'un canal entre la source et le tunnel, du tunnel lui-même, et d'un canal entre la sortie du rocher et la ville, dura environ 10 ans, sous le règne de Polycrate. La première étude moderne de ce tunnel fut exécutée par l'archéologue allemand Fabricius, en 1884; d'autres ont suivi, et la dernière est probablement celle entreprise en 1972 et 1973 par l'Institut archéologique allemand à Athènes, dont les résultats figurent dans plusieurs publications.

L'implantation du tunnel

Le projet était de construire un tunnel rectiligne horizontal, ce qui exigeait la même altitude pour les deux portails. Le problème de trouver l'axe du tunnel était en principe le même que de nos jours: il s'agissait de déterminer la distance et la différence de niveau entre l'entrée et la sortie; il fallait en particulier trouver la direction de l'axe du tunnel aux deux extrémités. L'ouvrage était donc constitué du tunnel proprement dit, horizontal, et d'une conduite d'eau creusée latéralement, dotée d'une légère pente créant une différence de niveau croissante par rapport au tunnel. Cette différence de niveau atteignait 3,5 m au nord et jusqu'à 8,5 m au sud. Pour le profil, on avait choisi 1,8 m en largeur et en hauteur, ce qui permettait à deux hommes de travailler de front. Pour de longues parties du tunnel, qui est creusé dans un calcaire massif, un voûtage n'était pas nécessaire. Par contre, il en fallait au voisinage des deux extrémités (Fig. 11).

Si l'on cherche à trouver les méthodes de mensuration appliquées par les Grecs, on est réduit, comme on l'a déjà dit, à des suppositions. La méthode la

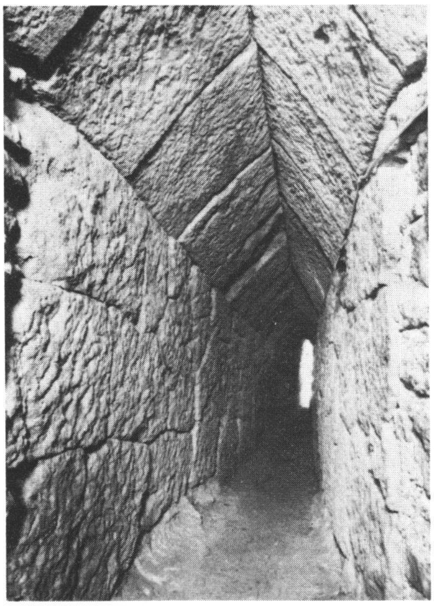

Fig. 11 Voûtage dans la partie sud du tunnel.

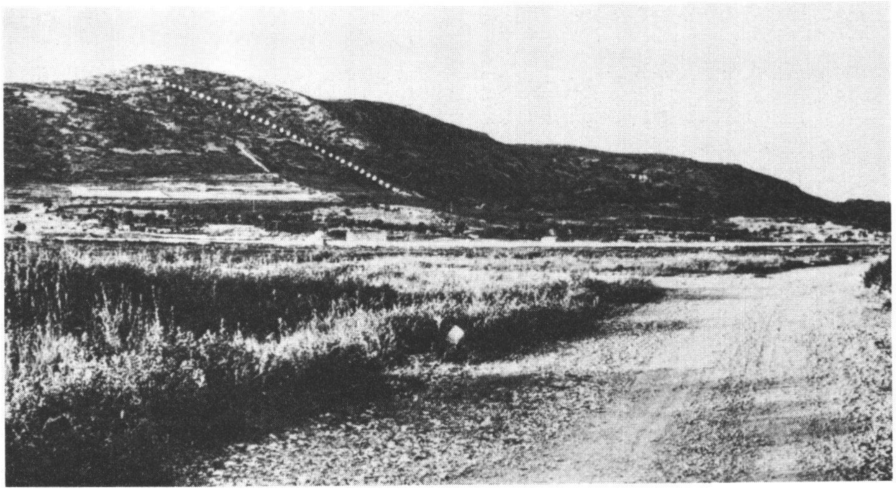

Fig. 12 Vue sud de la colline, avec le tracé du tunnel.

plus convenable et la plus simple aurait été de déterminer la direction, la distance et la différence de niveau par un jalonnement direct dans le terrain, étant donné que la visée directe entre un point sur la montagne et les extrémités du tunnel était possible. Afin d'établir les directions en ces deux points, il suffisait de déterminer la droite au point culminant, ce qui était possible à l'aide d'un instrument comme le dioptre, qui était connu à cette époque. En ce qui concerne la distance, elle pouvait être mesurée directement avec des lattes de bois disposées horizontalement. Cette opération permettait de déterminer aussi les différences de niveau, si on plaçait aux extrémités des lattes horizontales des lattes verticales sur lesquelles on pouvait faire des lectures ou déplacer une marque mobile. Ce procédé direct qui s'imposait par sa simplicité avait le désavantage incontestable de n'être pas facile à appliquer dans un terrain comme celui que montre la figure 12. Mais eu égard à l'importance de l'ouvrage, on ne peut pas exclure que le tyran ait fait abattre la forêt le long du tracé afin d'obtenir des conditions favorables pour les mensurations. Quant à la précision obtenue, on peut l'estimer grâce à la technique de percement dont on parlera plus loin. Une autre indication en est fournie par le fait que les altitudes des extrémités du tunnel ne diffèrent que d'un demi-mètre; une précision qui pouvait être atteinte sans difficulté par le procédé décrit.

Déjà dans l'Antiquité, un autre point de vue sur la technique d'implantation du tunnel fut proposé. Le fameux mathématicien et physicien grec, Heron d'Alexandrie, qui vivait au deuxième siècle apr. J.C., donc six cents ans après la construction du tunnel de Samos, décrit une méthode indirecte qui est devenue la méthode habituelle jusqu'à nos jours. D'après la figure 13, on relie les deux bouts du tunnel à construire par un cheminement ou par une triangulation. Comme à l'époque d'Eupalinos on ne savait pas encore mesurer des angles quelconques, on formait dans le terrain des triangles rectangles, dont les côtés pouvaient être calculés à l'aide du théorème de Pythagore. Cette chaîne de triangles permettait de déterminer l'angle entre la direction du tunnel et le côté d'un des triangles, ainsi que la longueur du tunnel. Il va de soi qu'à l'époque d'Eupalinos, vu les appareils disponibles, les triangles devaient se trouver dans un terrain horizontal, ce qui n'était possible que si l'on choisissait des pentes peu inclinées autour de la montagne. Il n'est pas exclu, mais pas démontré non plus, que les constructeurs du tunnel de Samos se soient servis de ce procédé. Si c'est le cas, il faut donner raison au mathématicien hollandais Van der Waarden, qui écrit dans son excellent ouvrage ‹Erwachende Wissenschaft›, que ‹le tunnel d'Eupalinos est l'un des premiers et impressionnants exemples de l'application pratique de connaissances théoriques›.

Si Eupalinos connaissait la methode directe et la méthode indirecte, il avait à se décider pour l'une ou pour l'autre. Mais il avait aussi la possibilité de combiner les deux méthodes, ce qui lui aurait permis un contrôle important. N'oublions pas qu'au début de notre siècle encore, on a opté pour un tel contrôle: nous pensons au tunnel ferroviaire du St. Gotthard, pour lequel la Direction des travaux demandait encore en 1884 qu'on mette en place deux triangulations indépendantes qui devaient très bien se contrôler, puis qu'on reporte les directions des axes sur le terrain depuis les deux bouts jusqu'à leur point de rencontre. Comme ce point se trouvait sur une arête rocheuse, l'opération exigeait de beaux talents d'alpiniste! Une trentaine

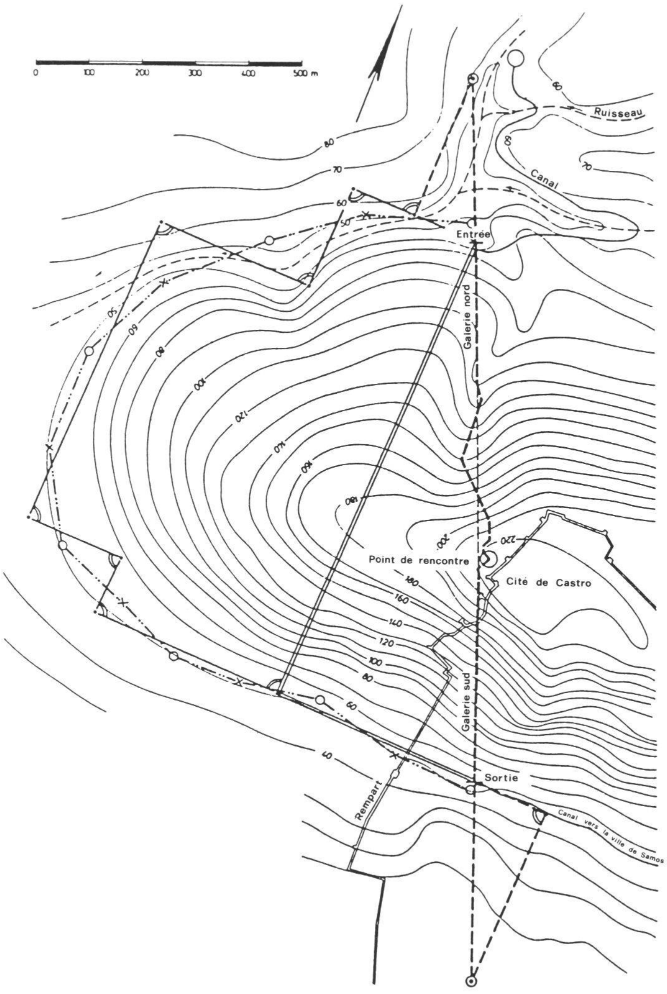

Fig. 13 Hypothèse de l'implantation du tunnel par un cheminement orthogonal extérieur.

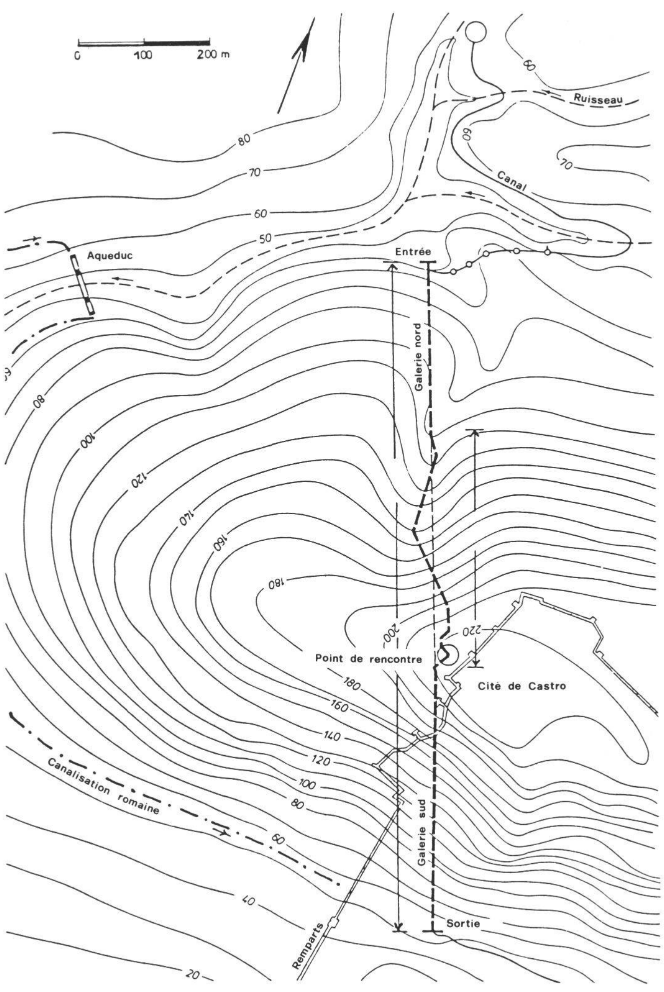

Fig. 14 Esquisse topographique avec le tracé du tunnel. On distingue facilement le tracé rectiligne aux extrémités et le tracé en zig-zag de la partie centrale.

d'années plus tard, quand on perçait le tunnel du Lötschberg, on détermina aussi en haute montagne des points de la ligne joignant les deux portails. A l'époque d'Eupalinos, où l'art de mesurer n'était qu'au début de son développement, un contrôle était plus nécessaire que de nos jours, et il paraît logique d'admettre qu'on ait employé les deux méthodes, si on les connaissait. Mais appréciait-on déjà l'importance de tels contrôles?

On a déjà dit, et la figure 14 le rappelle, qu'on a percé la montagne en commerçant aux deux bouts. La partie Sud est parfaitement rectiligne jusqu'au point de rencontre. Par contre, l'attaque Nord n'est rectiligne que sur 200 mètres, et à partir de là, le tracé présente plusieurs coudes. L'axe du tunnel est donc un zig-zag pour tout le tiers central. Fabricius, le premier explorateur du tunnel, a donné il y a cent ans déjà, une explication pour ce tracé particulier, disant qu'il fut choisi pour qu'on soit sûr que les deux axes se rencontreraient. Cette explication ne fut jamais contestée, et elle est confirmée par quelques constatations plus récentes.

Il faut mentionner d'abord que d'après les relevés de l'Institut Archéologique Allemand d'Athènes, il y a une déviation non négligeable entre la section Nord du tunnel et la droite qui joint les portails. Il en résulterait une déviation latérale de 11,4 m pour la longueur totale du tunnel, et de 6,3 m depuis le bout Nord du tunnel jusqu'au point de rencontre. En choisissant pour le tiers central un tracé en zig-zag s'écartant jusqu'à 30 mètres de la ligne idéale, Eupalinos a opté pour la solution garantissant le mieux la rencontre des deux fronts d'attaque. Mais ce qui étonne encore davantage, c'est que cette ligne en zig-zag n'est pas une ligne quelconque; elle forme un polygone plus ou moins régulier, et on trouve à chaque sommet des points de repère peints. Même si une grande partie de ces points ne peut pas être expliquée parce qu'ils appartiennent à des systèmes différents, il est certain qu'un de ces systèmes fait partie du cheminement. On constate que les longueurs des côtés étaient des multiples d'une longueur-unité adoptée pour le tunnel et que les angles du polygone étaient de 50 ou de 25 gon, des angles donc qu'on pouvait trouver facilement en construisant d'abord la bissectrice d'un angle droit, puis celle d'un angle de 50 gon. Se basant sur ce cheminement, Eupalinos pouvait connaître l'orientation du tunnel par rapport à la direction du Nord, et prévoir ainsi le point de rencontre avec une certaine exactitude. La figure 8 déjà citée montre le détail de cette rencontre.

Ce résumé sur le tunnel d'Eupalinos, dans l'île de Samos, ne peut pas être complet, pas plus que le résumé précédent sur la Grande pyramide. Mais même dans un exposé plus long, beaucoup de questions soulevées dans la littérature très abondante seraient restées sans réponse. Le tunnel de Samos, d'ailleurs utilisé jusqu'au 7^{e} siècle apr. J.C. pour l'adduction de l'eau, continue de renfermer comme les pyramides, même si c'est à un moindre degré, quelque chose de mystérieux.

Prof. Dr. h. c. Fritz Kobold