

Le tunnel le plus ancien du monde : Eupalinos

*Par J.N. PLICHON, Ingénieur EP
Contrôleur Général Honoraire à Électricité de France*



Votre Président, que je connais bien, a dû penser à moi pour faire dans cette enceinte un exposé, que je dirais non conventionnel, pour la raison suivante : il y a environ 15 ou 20 ans, nous faisons les travaux d'aménagement hydroélectrique de la Durance et je me suis posé des questions à propos d'un aqueduc romain qui prend sa source à proximité du village de Jouques, à 25 km au nord-est d'Aix, et dont la tradition voulait qu'il soit une des alimentations en eau de la ville romaine d'Aix. Or, compte tenu de la cote imposée par la source, l'arrivée de la canalisation à proximité d'Aix, devait se faire au moyen d'un souterrain de plus de 6 km, sans fenêtre intermédiaire, et avec une couverture de 80 à 100 mètres d'épaisseur sur une bonne partie de son tracé. J'étais un peu sceptique sur l'existence de ce souterrain, et j'avais demandé à M. CATINOT de relever les cotes de l'aqueduc, pour voir s'il n'aurait pas pu aboutir ailleurs qu'à Aix. Or en faisant ce relevé, M. CATINOT a retrouvé l'entrée du souterrain, d'ailleurs transformé en source, à une cote correspondant à celle nécessaire pour aboutir à la source des Pinchinats, dont la facture est romaine et qui alimente encore Aix de nos jours.

Ainsi le souterrain existe, mais comment il a été réalisé dans un terrain gorgé d'eau, et surtout comment a été fait le pilotage des galeries attaquées par plusieurs puits dont certains de près de 100 mètres, cela reste mystérieux. Je ne vais donc pas vous par-

ler de ce tunnel, mais d'un autre beaucoup plus ancien, celui d'Eupalinos.

C'est en moins 525, donc il y a plus de 2 500 ans qu'a été percé dans l'île de Samos un souterrain de 1040 mètres, attaqué par les deux extrémités. Le génial ingénieur et topographe, projeteur et directeur des travaux, s'appelait Eupalinos de Mégare. Son nom nous a été conservé par Hérodote qui donne une description très exacte de cet ouvrage. Hérodote a dû se trouver à Samos aux environs de moins 460 et avait certainement visité le souterrain.

L'île de Samos fait partie des Sporades dans la mer Egée, elle est très proche de la côte turque. L'ancienne capitale, Samos, a été rebaptisée Pythagorion, à cause du célèbre mathématicien et philosophe qui était originaire de cette ville (vers - 580).

Les travaux du tunnel ont été faits, lors de la splendeur de Samos, sous le règne du tyran Polycrate. Il fait partie d'un ensemble d'ouvrages décidés par Polycrate pour faciliter la défense de sa ville et était un élément d'une adduction d'eau entièrement invisible de l'extérieur pour permettre de soutenir un siège de longue durée. On pense qu'il a été utilisé jusqu'à l'époque de Bysance ; retrouvé en 1882, il a été récemment entièrement restauré sur toute sa longueur par des archéologues allemands, et c'est ainsi que j'ai pu le visiter de bout en bout l'été dernier.

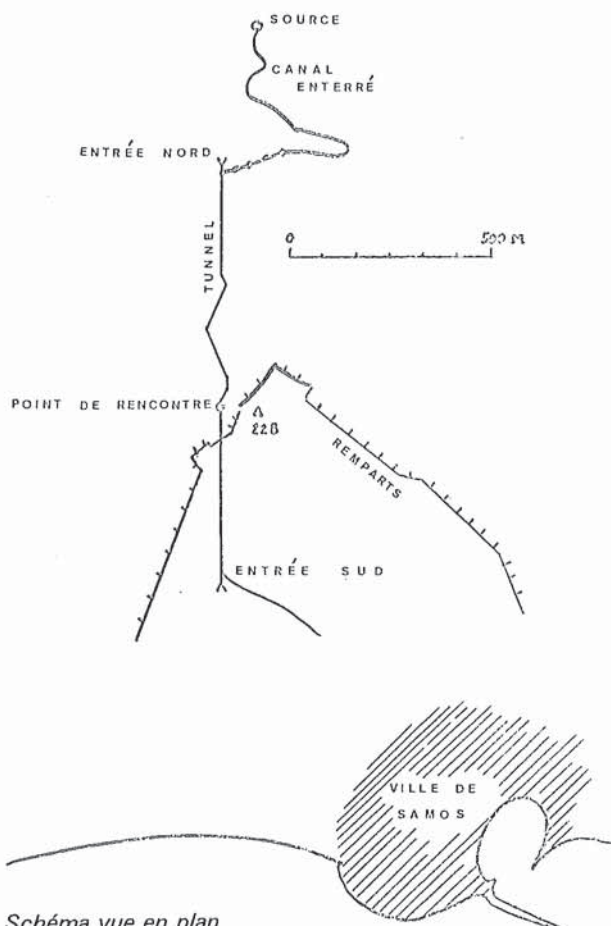


Schéma vue en plan

Je vais maintenant passer à la rapide description de l'ouvrage.

Il est à peu près orienté Nord-Sud. On trouve d'abord un réservoir enterré, puis une canalisation souterraine de 850 mètres de longueur. Sur la majeure partie c'est une tranchée couverte, les derniers 150 mètres étant réalisés en galerie attaquée par des puits. La canalisation, en poterie, aboutit à l'entrée Nord du souterrain. Celui-ci commence par un escalier de 18 marches descendant jusqu'au radier du tunnel proprement dit. Celui-ci est pratiquement horizontal ; il a 1 040 mètres de longueur et à l'extrémité Sud il se termine par un autre escalier montant vers l'extérieur et dont l'entrée est abritée par un petit bâtiment moderne. L'adduction d'eau quitte ce tunnel un peu avant l'extrémité Sud et la conduite extérieure n'a pas été entièrement reconnue. Le tunnel est creusé dans un calcaire blanc massif sous une montagne qui domine le tunnel de 170 mètres environ.

Voici maintenant le profil en travers du souterrain : ses dimensions 1,80 x 1,80. Il est normalement brut, mais certaines sections étaient soutenues suivant le modèle indiqué par le croquis. L'eau ne coulait pas dans le tunnel lui-même (d'ailleurs il était horizontal) mais dans le fond d'un canal creusé au droit de la paroi Est, et dont la profondeur varie de 3,50 m au Nord à 8,50 m au Sud. Ce canal était parfois couvert et parfois laissé ouvert. La pente de la conduite dans le fond de ce canal était donc de 5°/100.

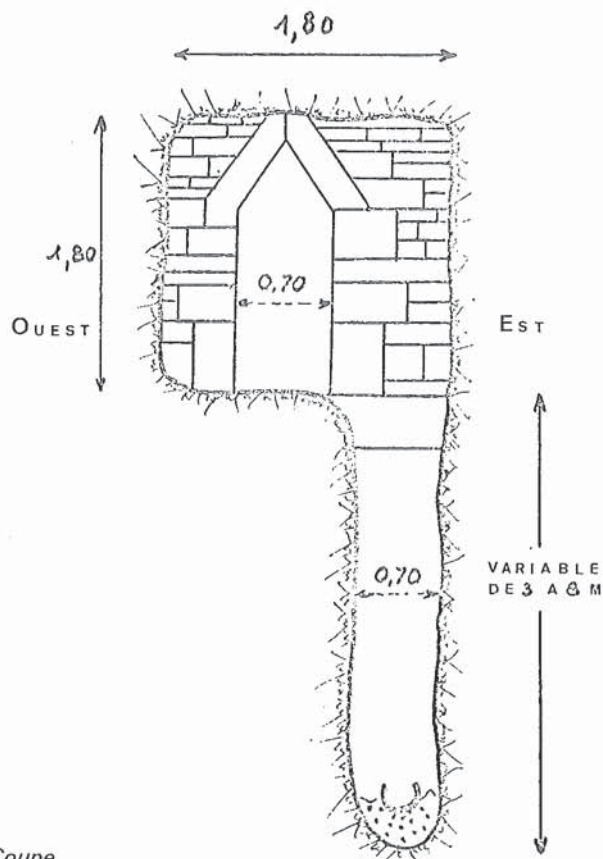
Vous pouvez voir maintenant le profil en long schématique du tunnel.

La durée des travaux n'est pas connue, en général on l'estime à 10 ou 15 ans, mais mes réflexions personnelles me conduisent à penser que 5 ans étaient suffisants avec un effectif inférieur à 100 personnes.

La question qui se pose est de savoir comment Eupalinos avait déterminé la cote et la direction des 2 attaques.

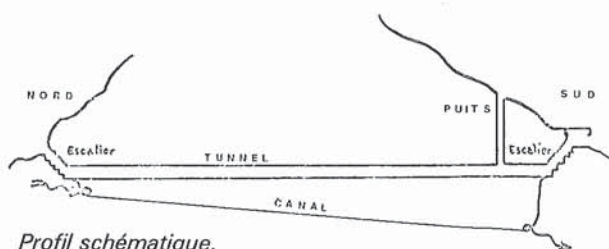
Tout d'abord comment avait été déterminée la direction ?

On doit d'abord détruire la légende qui veut que Pythagore ait été associé à la solution, car à cette époque il avait quitté Samos depuis longtemps.



Coupe

Une autre théorie repose sur un écrit de Héron d'Alexandrie qui vivait 600 ans après les travaux. Cet ingénieur et mathématicien qui vivait au premier siècle après Jésus-Christ, a écrit un certain nombre de traités techniques parmi lesquels son traité sur le dioptré. Il y décrit avec précision cet instrument dont l'invention lui est attribuée. Il donne aussi une application pratique de cet instrument à la solution du problème suivant : déterminer la direction d'un souterrain lorsque les entrées ne sont pas visibles simultanément.



Profil schématique.

Héron résout le problème en disposant un système de coordonnées rectangulaires autour de la montagne, justement avec l'emploi du dioptré. On voit parfaitement le schéma de cette opération sur un manuscrit de la bibliothèque nationale. Il est hors de doute que Héron avait présent à l'esprit le tunnel d'Eupalinos, qui était bien connu dans l'ancien temps, mais cela ne prouve pas du tout qu'Eupalinos l'ait employé ; et d'ailleurs le dioptré n'était probablement pas connu à son époque. Il y a un autre motif qui fait rejeter la méthode de Héron, c'est que même avec des instruments modernes il est pratiquement impossible de faire des visées orthogonales, à altitude constante, autour de la montagne.

Aussi, la solution d'Eupalinos devait être beaucoup plus simple et consister à jalonner une ligne droite, par dessus la montagne, d'une entrée à l'autre. On voit une preuve de cette façon d'opérer dans le fait que les entrées sont situées en des points qui allongent le tracé de la conduite, mais qui sont les seuls permettant d'aligner facilement des jalons par dessus la montagne.

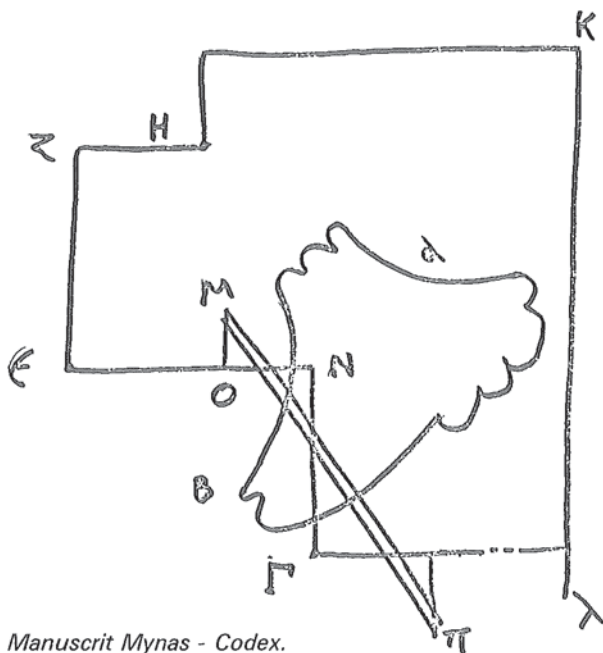
Le pilotage des attaques pendant les travaux, pose aussi un certain nombre de questions.

Tout d'abord on peut remarquer que la partie Sud est parfaitement rectiligne jusqu'au point de rencontre. On peut d'ailleurs apercevoir la lumière du puits Sud jusqu'à une assez grande distance de l'entrée.

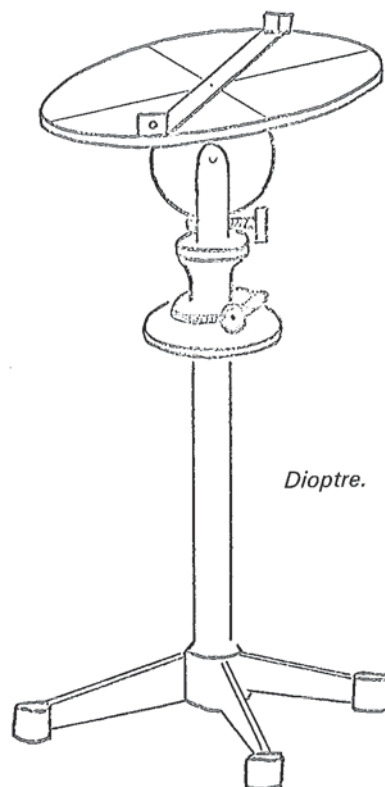
Par contre l'attaque Nord n'est rectiligne que sur 200 mètres et si elle avait continué dans cette direction, elle aurait assez exactement rencontré la galerie Sud. Mais à partir de là le tracé présente plusieurs coudes : il recoupe plusieurs fois la ligne théorique pour finalement rencontrer la galerie Sud dans un coude. L'écart maximum sur la ligne théorique est de 30 mètres à l'Ouest. Ce n'est certainement pas le hasard qui est responsable de ces coudes.

D'abord l'angle qui définit les coudes est d'environ 22° . Il est permis de penser que $22^\circ,5$ étant la moitié de 45° ce devait être une mesure facile à réaliser.

Ensuite, la distance à laquelle ces coudes ont été faits semble bien avoir été déterminée d'avance.



Manuscrit Mynas - Codex.



En effet on a retrouvé sur les parois du tunnel un très grand nombre de marques peintes correspondant soit à des mesures de longueur, soit à des indications de niveau. On a retrouvé 5 systèmes différents de mesures de longueur. Ils sont tous caractérisés par une lettre utilisée comme numérotation accompagnée ou non d'un trait vertical. Parmi ces systèmes il y en a un qui présente 2 zéros, l'un au Nord, l'autre au Sud et dont les lettres sont situées à gauche ou à droite d'un trait vertical. L'espacement entre deux traits verticaux est de 20,60 m, les longueurs étant mesurées suivant l'axe de la galerie. Sur une cinquantaine de marques d'origine, il en reste 27 visibles.

Le point de rencontre se situe presque exactement à la 21^e marque depuis le Sud et à la 30^e depuis le Nord. La longueur exacte du tunnel est ainsi de 51 unités, alors qu'elle aurait été de 50 suivant la ligne droite théorique. L'unité choisie a dû l'être en fonction de la longueur du tunnel car elle n'est pas un multiple exact des unités de longueur en usage à l'époque.

Pour en revenir à nos coudes, il est frappant de constater qu'ils correspondent avec précision à une marque de longueur. En particulier le coude correspondant au plus grand écart vers l'ouest se trouve exactement à la 20^e marque depuis l'origine Nord.

Il est donc absolument certain que ces zigzags de la galerie Nord sont volontaires. Ce qui m'a beaucoup étonné c'est que les archéologues allemands qui ont fait tout le travail de recherche et de dépouillement des mesures d'Eupalinos, se posent des questions sur la raison qui l'a conduit à faire des coudes alors que cela semble particulièrement évident.

Eupalinos a dû se rendre compte que si les deux attaques étaient rectilignes, compte tenu de l'imprécision de ses mesures, il avait de fortes chances de

rater la rencontre, alors qu'en faisant des ondulations en plan, il augmenterait sérieusement la probabilité de rencontre, sans augmenter sensiblement la longueur du tunnel.

Reste le problème du nivellement qui est beaucoup moins clair.

D'abord quelques indications sur la précision des mesures d'Eupalinos : le radier de l'entrée est à la cote 55,26 au Sud et 55,83 au Nord, soit une différence de 57 cm. Lorsque les attaques sont arrivées à proximité du point de rencontre, soit 25 mètres au Sud et 27 mètres au Nord, les radiers étaient à la cote 55,17 au Sud et 55,48 au Nord : c'est-à-dire que les écarts par rapport à l'horizontale d'origine étaient de moins 9 cm au Sud et de moins 35 cm au Nord. A ce moment là, Eupalinos a eu un cas de conscience et il a brusquement corrigé la hauteur des deux attaques : il en est résulté une différence de près de deux mètres entre les niveaux des radiers, au point de rencontre, alors que s'il n'avait rien changé l'écart n'était que de 30 centimètres.

En ce qui concerne les moyens de nivellement de l'époque, on ne sait pas grand chose.

Vitruve qui vivait au 1^{er} siècle avant Jésus-Christ a décrit un appareil nommé "chorobate", qui était en usage à cette époque et qui était un niveau à eau de grande dimension. Était-il en usage du temps d'Eupalinos, nous n'en savons rien. En tout cas, qu'Eupalinos ait fait le nivellement par dessus la montagne ou en faisant le tour, ce qui est moins probable vu la longueur du cheminement horizontal, la précision obtenue est étonnante. Si le nivellement a eu lieu par dessus la montagne, il faut compter 70 visées pour des piquets de 5 mètres et la précision des mesures, pour une distance de 15 mètres en moyenne entre piquets, aurait été de l'ordre de quelques centimètres.

On peut se poser aussi la question suivante : quelle est la raison de la profonde tranchée latérale pour installer la conduite d'eau ? Il aurait été évidemment plus simple de construire le tunnel avec la pente voulue de 5°/100. Je pense que creuser une galerie horizontale était déjà un problème suffisamment compliqué à l'époque pour qu'Eupalinos n'ait pas cherché à le rendre encore plus difficile en adoptant une galerie à pente constante.

Dans les mêmes conditions que pour les repères de distance, on a retrouvé beaucoup d'indications de nivellement sur les parois du tunnel : sur les 2/3 de la longueur, car le tiers en est caché par le soutènement ou par des coulées d'argile, on a relevé 430 marques de niveau, appartenant à 5 systèmes différents, et répartis sur 1,30 m de hauteur de parois.

Tous ces systèmes présentent des décalages en niveau à des distances pouvant correspondre à la portée optique d'un appareil de nivellement. Malgré que ces repères soient tracés avec précision, épaisseur du trait 1 cm et visiblement tracés à la règle, on n'a retrouvé aucune continuité horizontale pouvant avoir donné le nivellement du tunnel proprement dit. Comme ces marques sont uniquement sur la paroi Est qui est celle de la tranchée du canal, et que sur une certaine longueur l'un des systèmes est exactement parallèle à la canalisation, on peut penser que ces indications concernaient seulement le travail de creusement de la tranchée et l'implantation de la conduite.

Ainsi que vous le voyez, il reste encore pas mal de points obscurs dans la façon dont a été exécutée la topographie de cet ouvrage : en particulier je serais très reconnaissant à ceux qui auraient des renseignements sur les moyens de topographie employés dans l'antiquité, de bien vouloir me les communiquer.

Pour terminer, on doit observer que le souterrain de Samos est un ouvrage tout à fait remarquable à plus d'un titre : l'originalité de sa conception et son exécution avaient même frappé les anciens. Ainsi Hérodote indique que les trois plus grands ouvrages que possède la Grèce, se trouvent à Samos : le tunnel d'Eupalinos, une digue de protection du port, qui fait 350 mètres de longueur pour 30 mètres de fond, et le temple d'Héra, le plus grand de tous les temples connus. Mais il cite en premier le tunnel.

Eupalinos de Mégare était donc certainement un génial précurseur ; c'était un ingénieur et un topographe hors pair ; il est heureux que, grâce à Hérodote, son nom soit parvenu jusqu'à nous, et que grâce aux travaux de restauration récents, son œuvre soit enfin mieux appréciée.

■