

# Le premier tunnel du Gothard

**Comment fait-on pour que deux équipes de mineurs se rencontrent à mi-course lors du percement d'un ouvrage souterrain ? Voilà le défi lié à l'implantation d'un tunnel d'une certaine longueur, quand les travaux sont entrepris simultanément par les deux extrémités. La problématique n'est pas née aujourd'hui : le premier tunnel du Gothard illustre comment, depuis longtemps, les géomètres guident ceux qui percent le sous-sol.**

Quand, après de longues négociations, les initiateurs du tunnel ferroviaire du Gothard purent se consacrer aux problèmes techniques, les extrémités du tunnel furent choisies selon des critères topographiques et géologiques. Il s'agissait de points séparés par des kilomètres de montagnes aux sommets parfois inaccessibles. Il appartenait alors à un géomètre de déterminer l'azimut, la distance et la pente entre ces deux points et d'en déduire les directions d'attaque.

## Avant le premier coup de pioche

La mission de définir les directions d'attaque fut confiée en 1869 au jeune ingénieur Otto Gelpke. Il créa, comme on le faisait avec succès depuis deux siècles, un réseau de triangu-

lation. Composé de onze triangles, celui-ci reliait les sommets entre Göschenen et Airolo (fig.1). Il équipa chaque sommet de piliers en pierre de taille, sur lesquels on pouvait fixer soit un signal, soit un théodolite (fig. 2).

Gelpke fit construire des maisonnettes-observatoires à toit mobile sur deux points du réseau situés sur l'axe théorique, en retrait des portails de Göschenen et d'Airolo, puis fixa dans le rocher au-dessus des futurs portails des cibles définissant l'axe du tunnel. Ce dispositif devait garantir durablement la position et la direction théorique du tunnel, protéger les instruments qui guideraient les premiers hectomètres de percement et permettre un contrôle d'azimut par des observations astronomiques. Il autorisait surtout l'utilisation, à la place du théodolite, d'une simple lunette d'alignement pour l'implantation progressive de l'axe rectiligne.

En haute montagne, il mesura avec soin - vingt-quatre fois chacun - tous les angles du réseau. Le massif du Gothard constituant de surcroît une frontière climatique, la nébulosité ne permettait que rarement d'observer simultanément dans toutes les directions, ce qui compliquait le travail du topographe. Tout fut pourtant exécuté en quelques mois, ce qui constitue un exploit compte tenu des moyens de l'époque. Par ailleurs, une analyse ultérieure des mesures de Gelpke

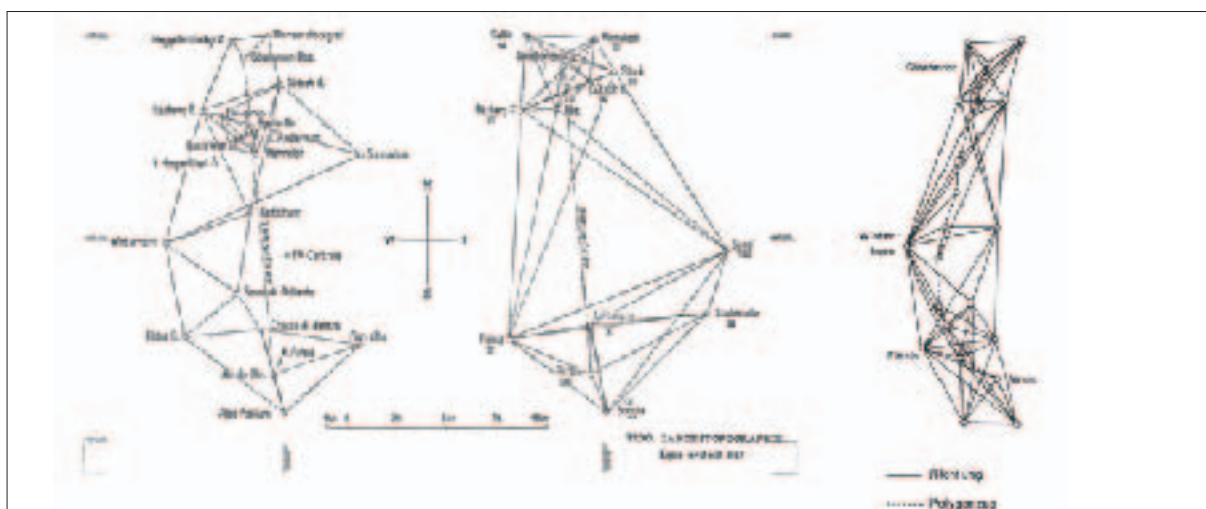


Fig. 1 : Réseaux d'implantation de Gelpke (à gauche) [7]<sup>1</sup> et de Koppe (au milieu) [8] pour le tunnel du Gothard et réseau d'implantation du tunnel routier du Gothard (à droite) (Schweizerische Bauzeitung, Heft 16, 1972). L'évolution de leur forme montre les progrès techniques : Koppe utilise de longues visées favorables à un transfert d'azimut ; le réseau moderne est plus compact grâce à l'apport de la mesure électronique des distances.

Fig. 2a et 2b : Piliers en pierre de taille aux sommets du réseau d'implantation pour l'installation des signaux ou des théodolites, Monte Leone, tunnel du Simplon (Die Bestimmungen der Richtung, der Länge und der Höhenverhältnisse, M. Rosenmund)

atteste une précision des directions de 0,7 mgon, correspondant à la largeur du petit doigt à une distance un kilomètre !

Mais était-ce suffisant ? « En 1872, alors que le percement du tunnel devait commencer, la direction des travaux se vit contrainte de déplacer le portail sud d'environ 150 mètres, ce qui entraîna une modification de la direction du tunnel. Une nouvelle triangulation n'aurait pas été nécessaire pour y remédier. Si la direction des travaux s'est cependant décidée à faire observer un second réseau, c'est qu'elle voulait bénéficier des meilleures assurances possibles en vue d'une jonction des galeries ». [1]<sup>1</sup>

La direction des travaux engagea alors Carl Koppe (1844-1910). Par souci d'indépendance, celui-ci adopta un réseau différent de celui de Gelpke, avec de longues visées entre les extrémités nord et sud (fig. 1) : « ... le but de la triangulation étant d'abord de déterminer la direction de l'axe, il convenait de relier les extrémités par les plus grands triangles possibles, sans stations intermédiaires ». [2]

Koppe introduisit une méthode de calcul révolutionnaire, celle des moindres carrés. En l'appliquant globalement à l'ensemble des mesures, il améliora la fiabilité des résultats en réduisant l'erreur moyenne sur une direction à 0,3 mgon. Par rapport à Gelpke, il obtint une différence d'orientation de l'ordre de 0,2 mgon à Airolo et à Göschenen et une influence globale du réseau inférieure à quatre centimètres sur l'erreur de percement : le travail de Gelpke aurait suffi et Koppe en apportait la preuve, tout en fournissant un prodigieux matériel de mesure expérimental pour le développement des méthodes de compensation des réseaux géodésiques, des méthodes dont on ne saurait se passer aujourd'hui.

Pour les altitudes, Gelpke compara les résultats de son réseau de triangulation avec ceux d'un nivellement direct effectué à sa demande par la Commission géodésique suisse : il trouva une différence inférieure à dix centimètres. Gelpke et Koppe profitèrent de ces résultats pour émettre l'idée que le coefficient de réfraction des calculs de nivellement trigonométrique était trop élevé en montagne et proposèrent de le ramener de 0,130 à 0,122.

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'encadré « Pour en savoir plus »

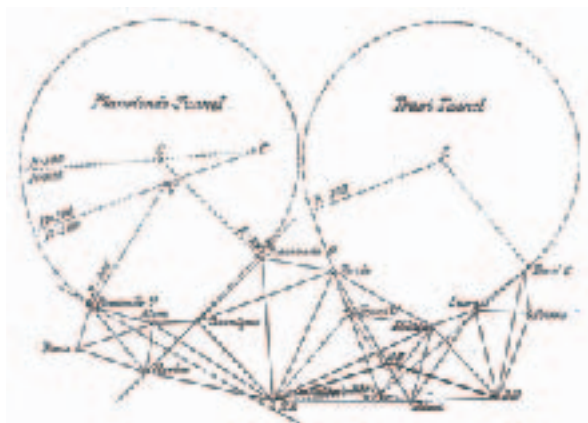
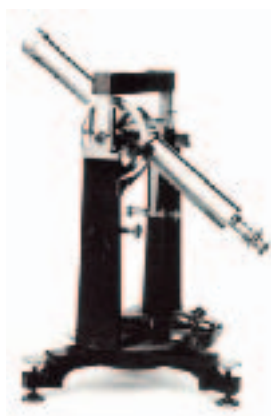
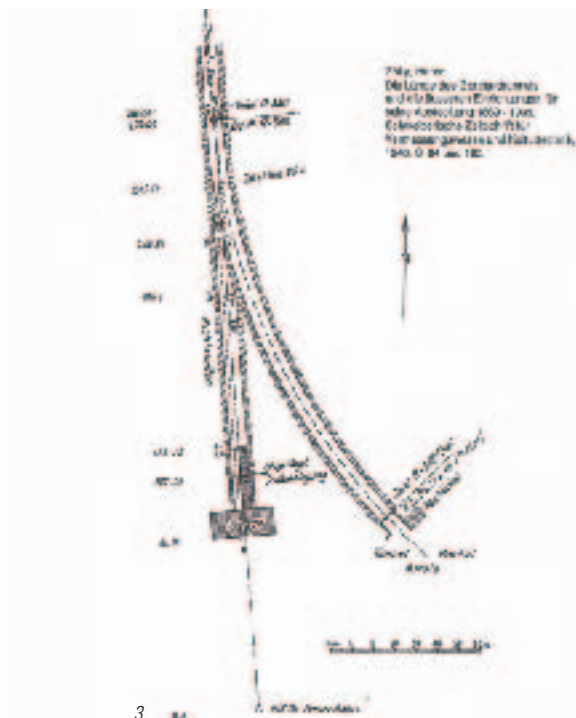


Fig. 3 : Galerie supplémentaire pour l'alignement du tunnel à proximité du portail d'Airolo (Hans Zölly, Schweizerische Zeitschrift für Vermessungen und Kulturtechnik, 1940)

Fig. 4 : Lunette utilisée pour l'implantation du tunnel du Mont-Cenis, puis pour le premier tunnel du Gothard [5]

Fig. 5 : Trépied universel développé par Koppe [5]

Fig. 6 : Schéma d'implantation des tunnels hélicoïdaux (Eisenbahn, 7. und 14. August 1880)



Ces excellents résultats auraient dû satisfaire tout le monde. Mais Koppe et la direction des travaux voulurent encore procéder à d'autres contrôles, par crainte de « rater la jonction ». Koppe entreprit de transférer par-dessus les montagnes la direction des axes depuis Airolo et Göschenen. Le profil topographique de l'axe était compliqué et les géomètres durent ajouter des poutres d'alpinistes à l'exécution déjà difficile des mesures géodésiques. Koppe estima l'écart latéral à une dizaine de centimètres. Cette fois, tout le monde était rassuré. Nous étions en 1875, six ans étaient passés, les géomètres avaient accompli un travail extraordinaire, mais le percement proprement dit n'avait toujours pas commencé.

### Les travaux

Koppe fut alors chargé d'organiser l'implantation à l'intérieur du tunnel. La crainte de rater la jonction n'était pas définitivement écartée : en effet, même pour un tunnel rectiligne, seul l'alignement des premiers hectomètres peut se faire depuis l'observatoire situé à l'entrée<sup>2</sup> (fig. 3). L'alignement se poursuit alors sur la partie excavée et toute faute se répercute sur la suite du travail. Si une erreur sur la distance serait pour ainsi dire sans conséquence, puisque les équipes finiraient bien par se croiser, un écart latéral ou vertical trop important serait catastrophique et le dispositif d'alignement doit donc chercher à les éviter.

On avait racheté la lunette d'alignement utilisée pour l'implantation du tunnel du Mont-Cenis<sup>3</sup> (fig. 4). Koppe exigea d'améliorer la visibilité aux abords des portails, de créer ou de perfectionner le matériel disponible : il imagina des trépieds universels avec chariots micrométriques (fig. 5), des lampes-cibles spéciales à pétrole avec flamme escamotable. Il imposa aux équipes des procédures d'une rigueur quasi-militaire. La communication entre ceux qui visaient la lampe et ceux qui alignaient la lunette sur les trépieds se faisait par des signaux sonores, d'abord avec des sortes de trompettes, puis plus tard avec un système de télégraphes reliés aux observatoires.

Les contrôles d'alignement avaient généralement lieu la nuit. Il fallait préalablement interrompre les travaux de forage pour que la ventilation naturelle rende à l'air ambiant une transparence suffisante. Comme c'est encore le cas aujourd'hui

<sup>2</sup> A Airolo, le tracé de la ligne comportait une courbe juste avant l'entrée du tunnel, si bien qu'il fallut creuser une galerie spéciale dans le prolongement de l'axe à planter pour permettre les visées nécessaires à l'alignement entre le portail et l'observatoire.

<sup>3</sup> A part son excellente optique, cet instrument était dans un état pitoyable et dut être entièrement réparé et modifié par le fameux constructeur H. Kern de Aarau.

d'hui, l'entrepreneur, soucieux de rendement, acceptait mal les exigences du géomètre et rechignait à lui accorder les conditions nécessaires à ses opérations minutieuses.

Le 29 février 1880, la dernière volée d'explosifs ouvrait une brèche permettant aux équipes de se rejoindre. Le contrôle final montra que l'erreur de percement atteignait trente-trois centimètres latéralement et sept centimètres verticalement (tabl. A)<sup>4</sup>. Gelpke, Koppe et leurs collaborateurs pouvaient être fiers de leur travail.

L'implantation des sept tunnels hélicoïdaux à proximité du portail nord fut beaucoup moins délicate que celle du tunnel principal, contrairement à ce qu'imagine le grand public : la longueur restreinte de ces ouvrages écartait le risque d'une dérive importante de l'axe. Koppe a résolu le problème en créant à proximité des tunnels de petits réseaux locaux incluant les éléments géométriques principaux de ces courbes : points d'entrée et de sortie ainsi que leurs tangentes. Il en a publié les schémas dans la revue *Eisenbahn* des 7 et 14 août 1880 (fig. 6).

| Tunnel                                       | Date du percement             | Erreur longitudinale | Erreur transversale | Erreur altimétrique |
|--|-------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Mont-Cenis ferroviaire 1870 / 12 km          | 25 décembre 1870              | 1355 cm              | env. 40 cm          | -                   |
| Gothard ferroviaire 1880 / 15 km             | 29 février 1880               | 710 cm               | 33 cm               | 7 cm                |
| Simplon ferroviaire 1905 / 19 km             | 24 février 1905               | 79 cm                | 20 cm               | 9 cm                |
| Lötschberg ferroviaire 1911 / 15 km          | 31 mars 1911                  | 41 cm                | 26 cm               | 10 cm               |
| Gothard routier 1976 / 16 km                 | 26 mars 1976                  | 5 cm                 | 5 cm                | 6 cm                |
| Eurotunnel ferroviaire 1990 / 50 km          | 1 <sup>er</sup> décembre 1990 | 7 cm                 | 36 cm               | 6 cm                |
| Lötschberg (base) ferroviaire 2005 / 34,6 km | 28 avril 2005                 | 10 cm                | 13,4 cm             | 0,4 cm              |

<sup>4</sup> Une erreur longitudinale sans grande conséquence de près de sept mètres ne fut partiellement expliquée que dans les années 1920-1930, à l'occasion de l'établissement d'une nouvelle triangulation de la région du Gothard.

### Un peu de géodésie physique

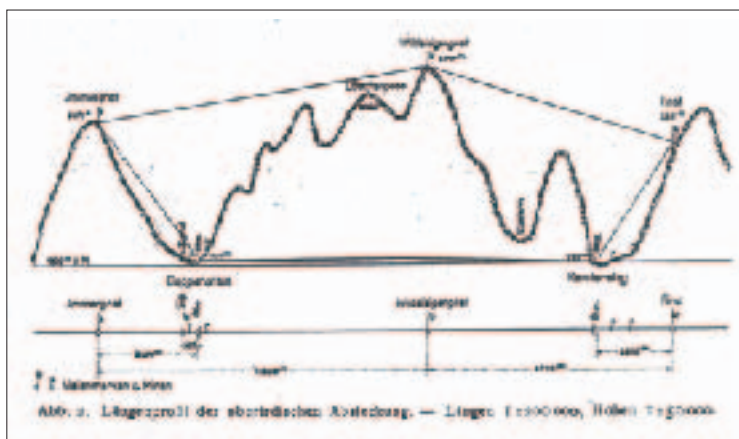
Le champ de pesanteur n'est pas régulier, puisque sa direction - qui sert de base à la définition de l'horizontale - et son intensité sont affectées par la répartition des masses terrestres et par l'irrégularité de leur densité. En toute rigueur, une surface horizontale n'est ni un plan, ni même une surface sphérique ou ellipsoïdique, mais une surface plus complexe. De même, les verticales ne sont ni parallèles, ni rigoureusement droites : on parle de déviation et de courbure des verticales. Ces phénomènes doivent impérativement être modélisés dans les calculs géodésiques des grands tunnels.

De plus, l'atmosphère terrestre est un milieu hétérogène, avec des gradients de température, de pression et d'humidité. La lumière y subit le phénomène de réfraction et ne s'y propage donc pas en ligne droite, ce qui affecte la mesure des angles ou les opérations d'alignement. La réfraction verticale était déjà prise en compte lors de l'implantation du tunnel du Gothard et l'on a vu comment Gelpke et Koppe avaient corrigé empiriquement sa définition. Si elle est généralement négligeable à l'air libre, la réfraction horizontale peut être source de perturbation dans les tunnels. En effet, la température des parois et celle de l'air y diffèrent créant un gradient horizontal important, surtout à proximité des parois ou au voisinage des portails<sup>5</sup>. Un gradient de 1°C par décimètre engendre un rayon de courbure de 100 kilomètres. Cela signifie qu'une visée qui traverse un tel gradient pendant dix mètres subit un changement de direction de 6 mgon, une erreur systématique inacceptable qui risque de s'accumuler sur l'implantation progressive d'un axe. On peut réduire cet effet en travaillant au centre du tunnel.

Sur les chantiers modernes, qui progressent 24 heures sur 24, l'axe est en permanence occupé et les géomètres ne disposent généralement que de quelques décimètres le long des parois pour leurs visées. L'exploitation des symétries du réseau, la mesure électronique des distances à partir des années 70 et les techniques de calcul permettent aujourd'hui de maîtriser cette réfraction latérale. Pour les longs tunnels, l'emploi additionnel d'un gyroscope « chercheur de nord » réduit encore cette erreur et offre tout au long du percement un contrôle indépendant des observations traditionnelles. C'est à la conjonction de ce matériel et de ces méthodes que l'on doit la qualité des implantations des grands tunnels modernes (voir article pp. 12 à 15 et pp. 18 à 21).

<sup>5</sup> Rosenmund a décrit ce phénomène au Simplon [10].

Fig. 7 : Profil topographique du tunnel du Lötschberg avec la définition des points pour vérifier l'implantation (Schweizerische Bauzeitung, 27. Dezember 1902)



### Le Simplon, puis le Lötschberg

Le percement des dix-neuf kilomètres du tunnel du Simplon s'est achevé le 24 février 1905. Les expériences acquises sur le Gothard permirent à l'ingénieur Max Rosenmund de perfectionner les méthodes et les instruments limitant encore les erreurs de percement (tabl. A).

Six ans plus tard, les équipes du tunnel du Lötschberg se rejoignaient. L'exactitude du point de rencontre est d'autant plus remarquable que le tracé n'est pas rectiligne, contrairement à ceux du Gothard et du Simplon : l'alignement ne suffisait pas et il fallut réintroduire le théodolite et la mesure d'angles. Il faut aussi signaler qu'on renonça d'emblée à créer un réseau de triangulation, pour se contenter de la mensuration nationale. Toutefois, le profil topographique au-dessus du tunnel était plus simple et un contrôle direct de l'axe « par-dessus la montagne » fut possible sans grande difficulté (fig. 7).

C'est évidemment à partir du GPS qu'ont été créées les nouvelles bases géodésiques nécessaires à la mensuration nationale et à l'implantation des nouvelles transversales alpines. Mais c'est là déjà une autre histoire...

Hubert Dupraz, ing. génie rural et géomètre EPF  
 Laboratoire de topographie  
 TOPO-ENAC-EPFL, Station 18, Ecublens, CH - 1015 Lausanne

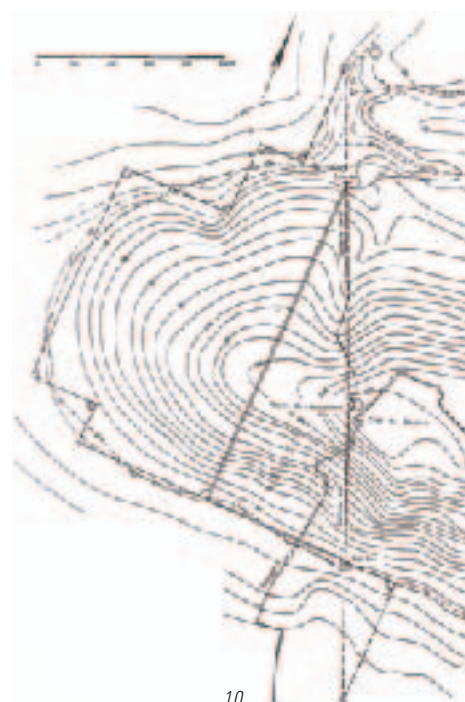
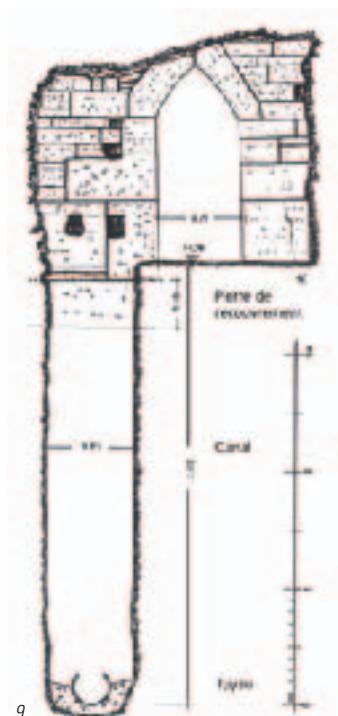


Fig. 8 : Voûtage dans la partie sud du tunnel d'Eupalinos sur l'île de Samos [3]

Fig. 9 : Coupe type [3]

Fig. 10 : Hypothèse de l'implantation par un cheminement orthogonal extérieur [3]

Fig. 11 : Stèle funéraire dédiée à Nonius Datus et retrouvée à Lambèse, dans l'Aurès [2]

Pour en savoir plus

**Sur les tunnels de l'Antiquité**

- [1] KLAUS GREWE : « Licht am Ende des Tunnels (Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau) », Verlag Philipp von Zabern, Mainz am Rhein 1998
- [2] KLAUS GREWE : « Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen », Verlag Chmielorz, Wiesbaden 1985
- [3] FRITZ KOBOLD : « Sur l'implantation de grands ouvrages de l'Antiquité », *Revue Géomatique suisse* (anc. *Mensuration-Photogrammétrie-Génie rural*), N° 8/1985, pp. 250-258

**Sur l'implantation du tunnel du Gothard**

- [4] LOUIS FIGUIER : « Les nouvelles conquêtes de la science : grands tunnels et railwails métropolitains », Librairie illustrée Marpon et Flammarion, Paris
- [5] HEINZ AESCHLIMANN : « Ein Tunnel abstecken im 19. Jahrhundert », Stadtmuseum, Alt-Aarau 1990
- [6] FRITZ KOBOLD : « Vor hundert Jahren : die Absteckung des Gotthard-Bahntunnels », *Revue Géomatique suisse* (anc. *Mensuration-Photogrammétrie-Génie rural*), N° 3/1982, pp. 49-54
- [7] OTTO GELPKE : « Bericht über die Absteckung der Sankt Gotthard-Tunnelaxe », *Der Civilingenieur* N° 16/Band 1870
- [8] CARL KOPPE : « Die Absteckung der Achse des Gotthard-Tunnel », *Zeitschrift für Vermessungswesen*, N° IV/Band 1875 et V/Band 1876

**Sur l'implantation du tunnel du Simplon**

- [9] Archives CFF 1<sup>er</sup> arrondissement Lausanne
- [10] MAX ROSENMUND : ...« Ueber die Absteckung des Simplon-Tunnels », *Schweizerische Bauzeitung*, N° 21 et 23/Band XXXVII

**Les précédents célèbres de l'Antiquité: Samos et Saldæ**

Le problème de l'implantation d'ouvrages souterrains n'est pas nouveau : six siècles avant Jésus Christ, le tyran Polycrate fit construire par Eupalinos un aqueduc souterrain de 1350 mètres dans l'île de Samos. Hérodote, puis d'innombrables auteurs jusqu'à nos jours, se sont penchés sur cet ouvrage extraordinaire. (fig. 8 à 10)

Les recherches archéologiques ont montré qu'Eupalinos avait d'emblée opté pour une stratégie qui incluait une progression en zigzag d'une des équipes dès la mi-parcours, ceci afin de rejoindre l'autre équipe, malgré une erreur d'orientation de plusieurs mètres. Les archéologues ont effectivement mis en évidence des écarts de cet ordre de grandeur, ainsi qu'un changement de stratégie en cours de travaux, probablement en raison de difficultés géologiques. L'aqueduc a malgré tout fini par fonctionner et il figure aujourd'hui parmi les principales attractions touristiques de l'île de Samos.

Sur le site d'un ancien comptoir phénicien, les Romains bâtirent au début de notre ère la ville portuaire de Saldæ. Leur premier souci fut de la pourvoir en eau potable. En l'an 137, le gouverneur Petronius Celer fit venir de Lambèse un *librator* - un géomètre - nommé Nonius Datus pour le charger de cette tâche. Cette histoire est relatée en latin sur une stèle funéraire trouvée à Lambèse (fig. 11):

« Nonius Datus proposa de capter la source de Toudja, à 21 kilomètres de là, par un aqueduc à flanc de coteau, incluant des ponts en arcade de grosses pierres et une galerie de 482 mètres, à percer dans un massif de calcaire très dur. Il fixa l'emplacement des extrémités et la direction de la galerie et préconisa d'attaquer le percement simultanément par les deux extrémités. Puis il retourna à Lambèse ! Le travail, avec de simples burins, dura plusieurs années, mais les deux galeries ne se rencontrèrent pas, quoique leur longueur totale dépassât largement la distance théorique. On fit revenir Nonius Datus. Il constata que les deux équipes avaient légèrement obliqué, rectifia les trajets, et l'eau arriva enfin... »

On peut admirer aujourd'hui encore cet ouvrage d'adduction, l'un des plus importants de l'Afrique romaine.

Eupalinos et Nonius Datus ne disposaient que d'instruments rudimentaires : le fil à plomb, le chorobate - sorte de grand niveau d'eau - et la groma - une équerre composée de quatre fils à plomb suspendus à une croix horizontale qui permet de créer sur le terrain des figures avec des angles droits (fig. 10).

Dans les deux cas, les équipes n'ont pas réussi à se rencontrer du premier coup. Cela n'enlève rien au courage de ces pionniers, qui menèrent à terme de telles entreprises il y a plus de vingt siècles. La stèle dédiée à Nonius Datus le rappelle par trois mots gravés en immenses caractères :

« Patientia, Virtus, Spes » (patience, courage, confiance) !

