

Méthodes de mesure et d'implantation des tunnels dans l'Antiquité

L'analyse des méthodes de mesure et d'implantation possibles pour le percement de tunnel s'est faite par l'exploitation des «sources (encore) pérennes» de l'Antiquité. L'expérience professionnelle acquise au long de mon activité d'ingénieur-géomètre dans le domaine du génie civil m'a été d'un grand secours à cet égard. La topographie avait pour mission de déterminer la longueur du tunnel ainsi que les méthodes nécessaires à sa mesure et à son percement. Les ouvrages souterrains, dont certains sont encore en service, présentent fréquemment des erreurs considérables, tant en direction qu'en altimétrie. La cause en est le cumul d'erreurs, provenant de méthodes de mesure différentes ainsi que de l'aspiration des maîtres d'œuvre à vouloir assurer une jonction en toute sécurité. Toute mesure est entachée d'une erreur, dont la taille est fonction de la topographie, de la précision, des instruments et de la méthode de mesure mise en œuvre. Une analyse détaillée des causes d'erreurs n'a pas pu être entreprise dans le cadre de ce travail. Les publications «Der Orthogonalzug nach Heron» («Le cheminement à côtés orthogonaux selon Héron») [9], «Nivelliergeräte des Altertums» («Les instruments de nivellement dans l'Antiquité») [11] et «Der Tunnel des Eupalinos auf der Insel Samos» («Le tunnel d'Eupalinos sur l'île de Samos») [13] contiennent cependant des indications relatives tant à la précision des instruments utilisés qu'à celle des méthodes mises en œuvre dans l'Antiquité, aussi applicables au percement de tunnel.

Die Untersuchung der beim Tunnelbau möglichen Mess- und Absteckverfahren erfolgte in Auswertung der aus dem Altertum noch «fliessenden Quellen». Hierbei war die Berufserfahrung des in der Bauvermessung tätigen Ingenieurs eine grosse Hilfe. Die Topographie bestimmte die Tunnellänge und die für die Bauausführung notwendigen Mess- und Vortriebsverfahren. Die Tunnelbauten, von denen einige noch in Betrieb sind, zeigen vielfach erhebliche Richtungs- und Höhenfehler. Ursache hierfür sind die Summierung von Fehlern aus mehreren Messverfahren sowie das Sicherheitsstreben der Baumeister, den Treffpunkt der Stollen risikolos zu erreichen. Jede Messung beinhaltet einen Fehler, dessen Grösse von der Topographie, der Genauigkeit der Geräte und dem eingesetzten Verfahren abhängt. Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine eingehende Fehleranalyse nicht erfolgen. Die Veröffentlichungen «Der Orthogonalzug nach Heron» [9], «Nivelliergeräte des Altertums» [11] und «Der Tunnel des Eupalinos auf der Insel Samos» [13] enthalten jedoch Angaben über die Genauigkeit der im Altertum eingesetzten Geräte und Verfahren, die auch für den Tunnelbau zutreffend sind.

Questo articolo analizza antichi metodi di misura e tracciamento per il traforo di gallerie sfruttando «fonti (ancora) perenni» dell'Antichità. A riguardo mi è stata estremamente utile l'esperienza professionale raccolta nel corso della mia attività di ingegnere-geometra, attivo nel campo del genio civile. La topografia aveva lo scopo di determinare la lunghezza della galleria nonché i metodi necessari di misurazione e traforo. Le opere sotterranee considerate, alcune delle quali sono ancora in servizio, presentano sovente grossi errori sia a livello di direzione che di altimetria. La causa risiede nel cumulo degli errori, provenienti da metodi diversi di misura e nell'aspirazione dei realizzatori di voler garantire il congiungimento con un alto fattore di sicurezza. Ma ogni misura contiene un errore, la cui rilevanza dipende da fattori come la topografia, la precisione, gli strumenti e il metodo di misurazione adottato. Durante que-

K. Peters, O. Reis

1. Historique du percement de tunnels

30 tunnels antiques nous sont connus, percés entre 700 avant J.-C. et 300 après J.-C. par les peuples des civilisations de l'aire méditerranéenne [1]. Ils étaient principalement destinés à l'adduction d'eau et à l'écoulement de lacs de cratères, leur longueur variant entre 50 et 6000 m.

La galerie d'écoulement d'un lac de cratère situé dans le massif de l'Eifel est l'exemple classique de tunnel du Moyen Âge. Percé par l'abbé Fulbert du monastère Maria Laach entre 1152 et 1170 sur une longueur de 880 m, ce tunnel présente, dans son exécution, des similitudes avec ceux de l'Antiquité [2]. L'essor de l'exploitation minière a ensuite fixé d'autres priorités à la topographie souterraine. Ainsi est né l'arpentage minier, (Markscheidekunst en allemand), «Mark-scheide» étant composé à partir des mots du haut allemand «Mark» (limite) et «scheiden» (séparer). Le mesureur, appelé géomètre minier, a pour mission de lever les positions planimétriques et altimétriques des excavations souterraines et de les représenter sur des plans. Le transfert des mesures à la surface emprunte et fournit le tracé des galeries. La possibilité est ainsi donnée de fixer les limites entre les différents secteurs d'abattage.

Le percement de tunnel est redevenu d'actualité avec l'essor du chemin de fer. En Allemagne le premier du genre fut foré de 1837 à 1839 près de Dresde [3]. Le percement de la galerie, d'une longueur de 512 m, fut entrepris depuis quatre puits verticaux, méthode dont l'utilisation est prouvée pour de nombreux tunnels de l'Antiquité. Deux tunnels pour bateaux sont particulièrement intéressants, mais très peu connus. Le plus ancien, long de 157 m et large de 6 m, est le tunnel Malpas, près de Narbonne, partie intégrante du canal du Midi aménagé de 1661 à 1681 [4]. Le second, projet de construction similaire, fut mené à bien en 1847 à Weilheim an der Lahn. Un épaulement ro-

sta ricerca non è stato possibile fornire un'analisi dettagliata sulle cause degli errori. Le pubblicazioni «Der Orthogonalzug nach Heron» (Il tracciamento ortogonale secondo Erone) [9], «Nivelliergeräte des Altertums» (Strumenti di livellazione nell'Antichità) [11] e «Der Tunnel des Eupalinos auf der Insel Samos» (Il tunnel d'Eupalino sull'isola di Samo) [13] contengono però delle informazioni sia sulla precisione degli strumenti utilizzati che sui metodi praticati nell'Antichità, utilizzabili anche per il traforo di una galleria.

cheux fut percé par un tunnel de 210 m de longueur, de façon à simplifier le chemin difficilement navigable aux abords de la ville.

2. Informations nécessaires au percement de tunnels

Au contraire de l'exploitation minière pour laquelle le lever topographique suit l'abatage, le tracé implanté sur le terrain est transféré dans la galerie pour le percement de tunnel. Il est nécessaire pour cela, de nos jours comme dans l'Antiquité, de disposer de plans du projet de construction, relatifs aussi bien à la planimétrie qu'à l'altimétrie et comportant les données propres aux directions, aux longueurs et aux altitudes. Dans l'Antiquité, les méthodes de mesure adaptées à l'établissement des plans et à l'implantation de l'ouvrage étaient définies par le maître d'œuvre, compte tenu de la longueur du tunnel, de la méthode de percement et de la topographie (figures 1 et 2).

Il n'existe pas de rapport datant de l'Antiquité décrivant en détail l'implantation et la mesure d'un ouvrage d'art ou d'un tunnel. Outre Héron [5], qui se livre à des considérations d'ordre général sur l'implantation de tunnels à l'aide d'un cheminement polygonal à côtés orthogonaux, seul le maître d'œuvre romain Nonius Datus nous a transmis quelques informations relatives à l'implantation du tunnel de Bougie en Algérie [6], effectuée par ses soins. L'exploitation de ces sources, les données issues de nouvelles mesures effectuées pour certains tunnels et la connaissance de la géométrie ancienne nous autorisent cependant à formuler quelques observations sur les méthodes de mesure et d'implantation de cette époque.

3. Direction et longueur de l'axe du tunnel

Lorsqu'un obstacle, tel qu'une montagne, se présente sur le tracé et l'interrompt, l'alignement direct n'est plus possible. Dans le cas de versants très pentus, la méthode classique est difficile à mettre en oeuvre, car elle consiste à réaliser un alignement depuis le milieu, situé sur un sommet arrondi. L'axe peut cependant être déterminé par prolongement de la direction depuis l'entrée A du tunnel jus-

qu'au sommet de la montagne puis au-delà de ce dernier, opération réitérée jusqu'à ce que le prolongement passe par le point B de l'axe, situé sur le versant opposé (Fig. 3). La fumée ascendante d'un feu allumé au point B permet une orientation grossière de l'alignement sur le sommet arrondi et réduit ainsi le nombre des tentatives.

Trois méthodes servant à la détermination de la longueur de l'axe sont connues: la mesure par cultellation en franchissant la montagne sur le tracé implanté, employée jusqu'à aujourd'hui pour des levés simples; la triangulation au-dessus de la montagne au moyen de triangles rectangles, pour laquelle, aux points A et B, donc à l'entrée et à la sortie du tunnel, une base perpendiculaire à l'axe du tunnel est établie; un triangle rectangle auxiliaire facilement mesurable, orienté vers un point matérialisé sur le sommet arron-

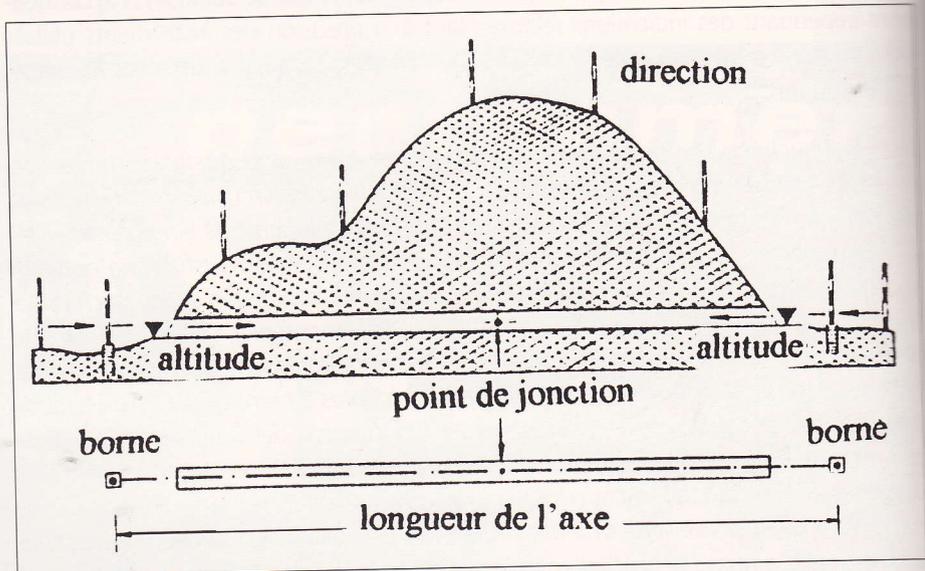


Fig. 1: Informations principales nécessaires au percement de tunnel.

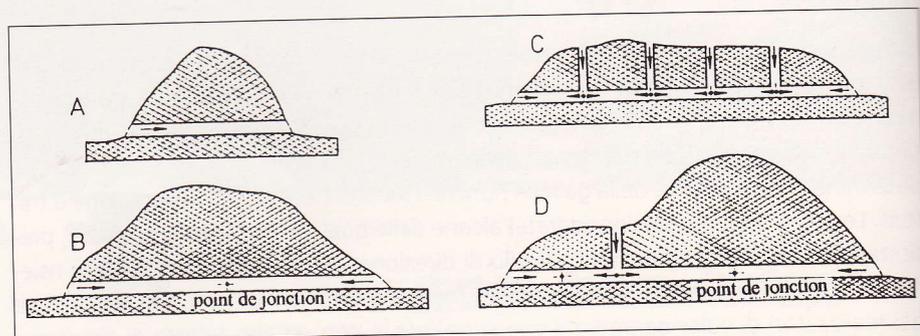


Fig. 2: Méthodes de percement de tunnel. A: depuis un côté. B: depuis les deux côtés. C: au moyen de puits verticaux. D: méthode combinée.

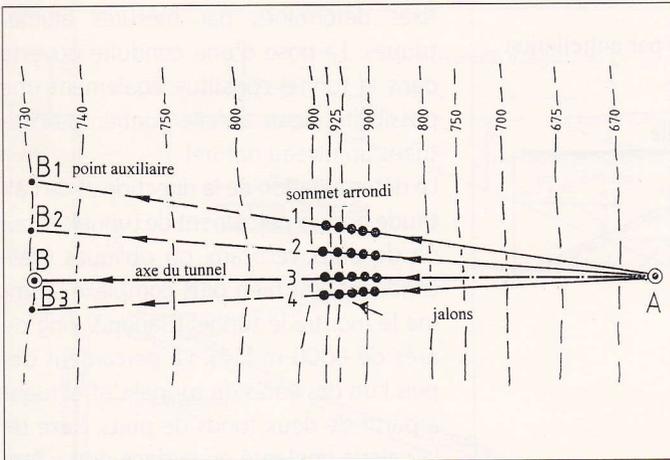


Fig. 3: Prolongement de la direction au-delà du sommet d'une montagne.

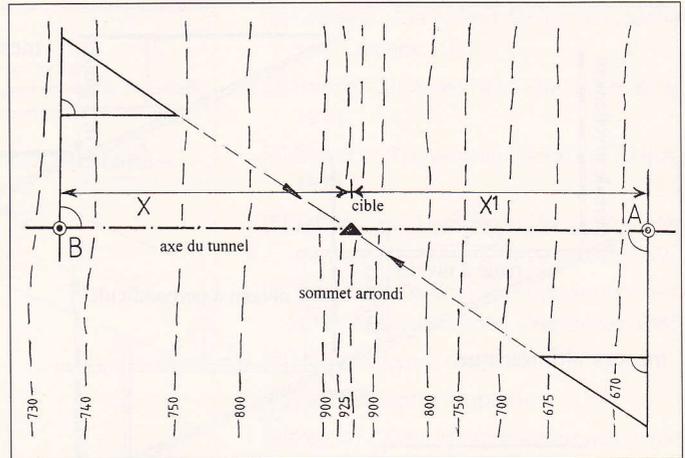


Fig. 4: Triangulation au-delà du sommet d'une montagne pour l'obtention de la longueur de l'axe.

di est implanté puis mesuré aux extrémités de chaque base (Fig. 4). Les deux distances partielles x et x_1 de l'axe du tunnel se calculent alors à partir des côtés mesurés des triangles auxiliaires et des longueurs de bases, par application d'une règle de proportion [7].

Au contraire des deux méthodes de mesure précitées, le problème d'Héron, en vue de la détermination de la longueur et de la direction de l'axe d'un tunnel, n'est résoluble qu'au terme d'un cheminement de montagne ou dans le cas d'un sommet tabulaire [8]. Héron résout le problème par le biais d'un cheminement polygonal à côtés orthogonaux contournant la montagne. Par addition et soustraction des longueurs des côtés, il obtient les côtés de l'angle droit d'un triangle rectangle, dont l'axe du tunnel constitue l'hypoténuse (Fig. 5). A l'aide de deux triangles rectangles auxiliaires homothétiques du grand triangle, il calcule puis implante la direction de l'axe du tunnel pour le percement depuis les deux côtés [9].

4. Altimétrie

Dans l'Antiquité déjà, le nivellement servait à déterminer les altitudes nécessaires à la conception puis au percement d'un tunnel. Héron d'Alexandrie nous en a transmis les modalités d'exécution [10], lesquelles diffèrent peu des méthodes de mesure actuelles.

Un instrument de nivellement (choroba-

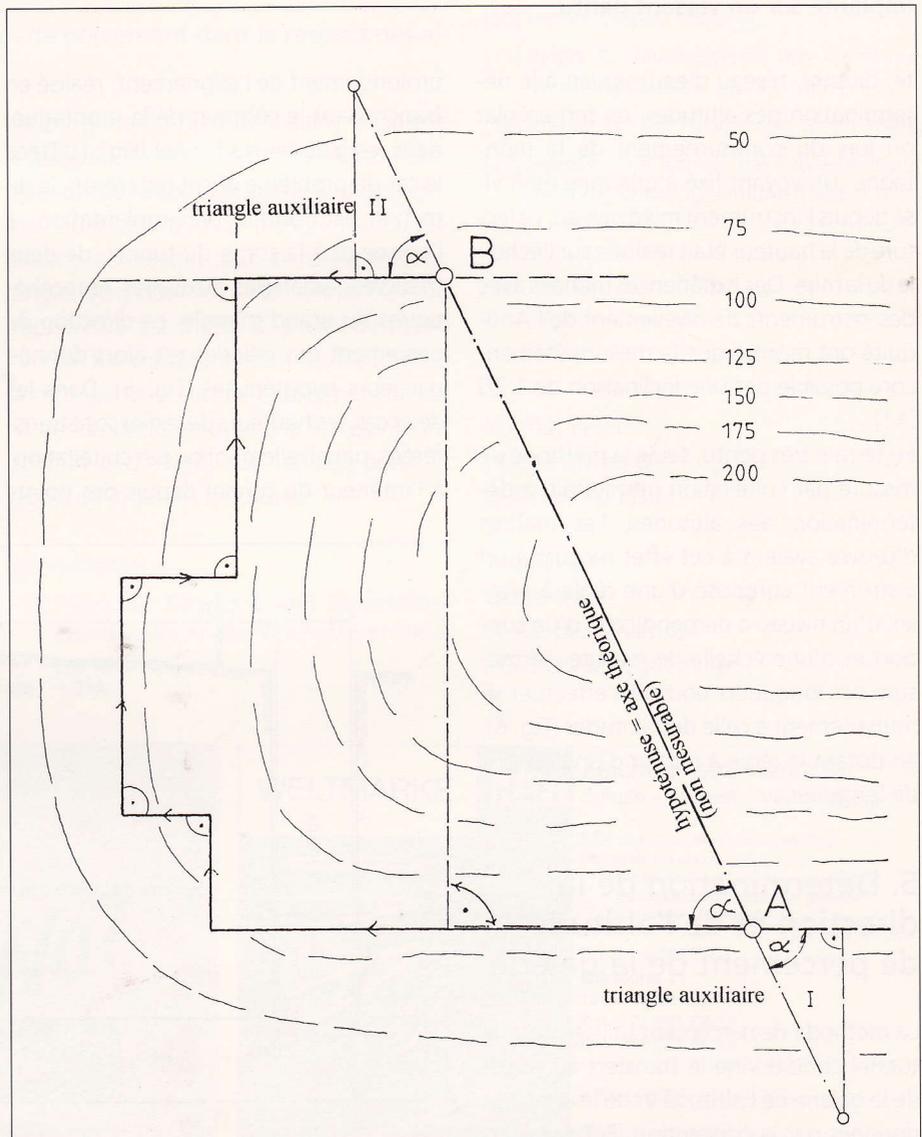


Fig. 5: Cheminement à côtés orthogonaux selon Héron pour la détermination de la longueur et de la direction de l'axe d'un tunnel.

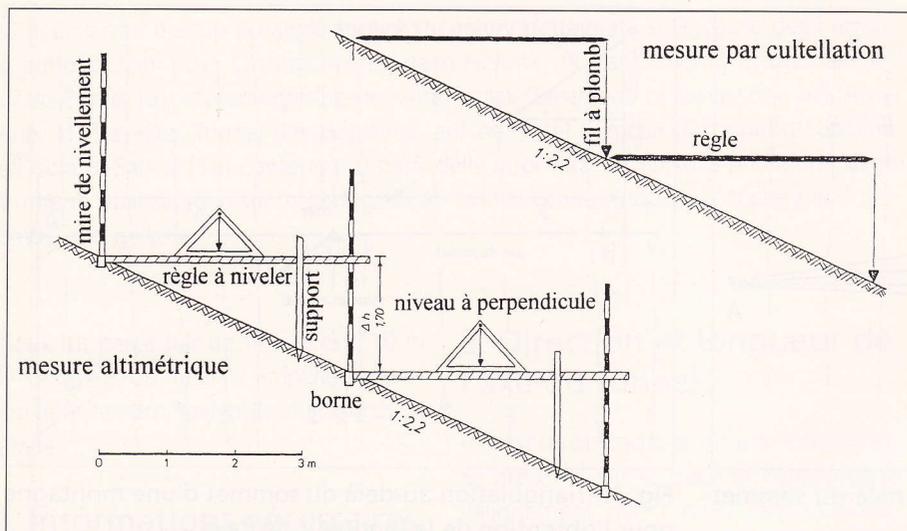


Fig. 6: Détermination de la longueur et de l'altitude par cultellation sur le tracé implanté sur un versant pentu.

te, dioptré, niveau d'eau) servait à la détermination des altitudes, en terrain plat ou lors du contournement de la montagne. Un voyant fixé à une mire était visé depuis l'instrument mis à niveau. La lecture de la hauteur était réalisée sur l'échelle de la mire. Des expériences menées avec des instruments de nivellement de l'Antiquité ont montré que la mesure était encore possible par une inclinaison de 1:20 [11].

En terrain très pentu, seule la méthode de mesure par cultellation permettait la détermination des altitudes. Les maîtres d'œuvre avaient à cet effet recours à un instrument composé d'une règle à niveler, d'un niveau à perpendiculaire, d'un support et d'une échelle de mesure. La mesure des longueurs pouvait s'effectuer simultanément à celle des altitudes (Fig. 6), en dotant la règle à niveler d'une échelle de longueur.

5. Détermination de la direction et de l'altitude de percement de la galerie

La méthode de percement utilisée pour le tunnel conditionne le transfert au radier de la galerie de l'altitude et de la direction données par la conception. Pour un percement depuis l'un des côtés ou depuis les deux, la direction est fournie par simple

prolongement de l'alignement, réalisé en franchissant le sommet de la montagne, dans les galeries du tunnel (Fig. 1). Dans le cas du problème décrit par Héron, la direction est fournie par implantation, à l'entrée et à la sortie du tunnel, de deux triangles rectangles auxiliaires homothétiques du grand triangle. La direction de percement des galeries est alors donnée par leurs hypoténuses (Fig. 5). Dans les deux cas, les hauteurs de radier sont transférées, par nivellement ou par cultellation, à l'intérieur du tunnel depuis des points

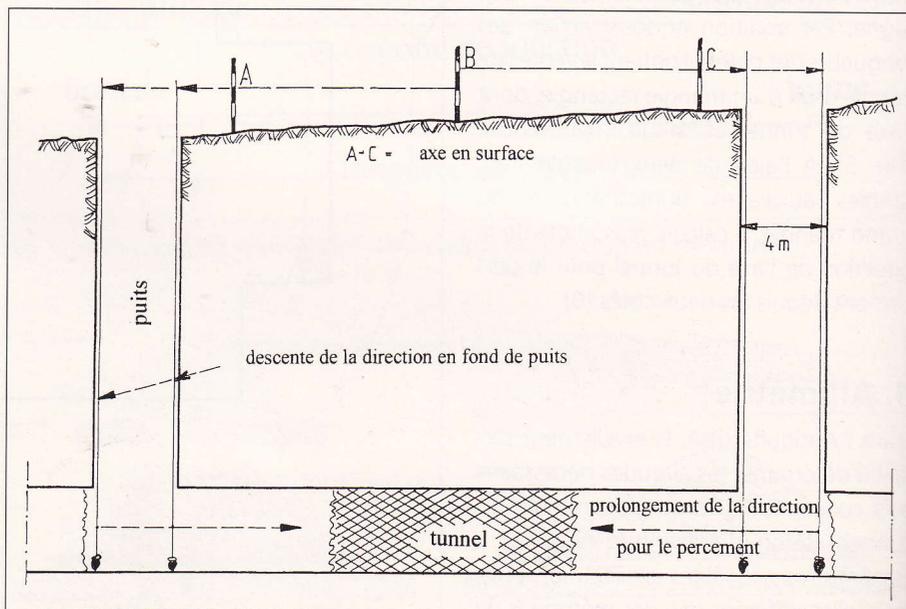


Fig. 7: Détermination de la direction pour le percement depuis un puits vertical.

fixes déterminés par mesures altimétriques. La pose d'une conduite ouverte dans le tunnel constitue également une possibilité, l'eau qu'elle contient constituant un niveau naturel.

La détermination de la direction et de l'altitude pour le percement de tunnels à l'aide de puits verticaux ou obliques (descenderies) est bien plus complexe, comme le montre le tunnel Claudius long de près de 6000 m [12]. Le percement depuis l'un des côtés du tunnel s'effectuant à partir de deux fonds de puits, l'axe de la galerie implanté en surface doit y être transféré au moyen de fils à plomb pesants (Fig. 7). Cette opération réclame beaucoup de précision, le prolongement d'une courte distance pouvant provoquer une erreur importante en direction. Si par exemple une direction descendue en fond de puits est entachée, dans le sens transversal, d'une erreur de 2 cm sur une distance de 4 m, elle s'amplifiera pour atteindre la valeur de 2 m au bout de 400 m. Les altitudes de radier prévues à la conception du tunnel sont transférées au fond par l'intermédiaire de cordes ou de chaînes d'arpenteur assujetties au bord supérieur du puits puis transmises pour le percement par le biais des instruments et méthodes précédemment définis. Les descenderies servent à une meilleure

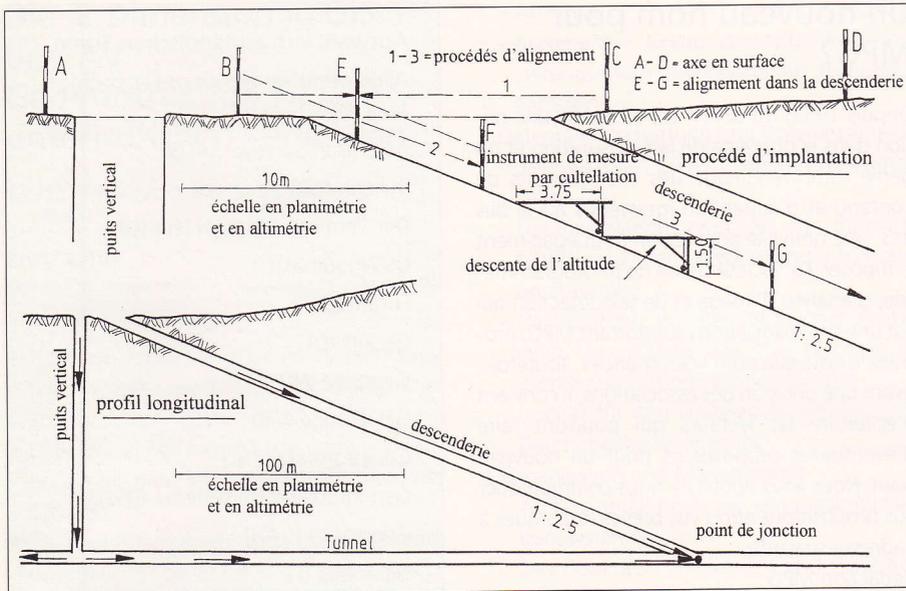


Fig. 8: Projet de descenderie et méthodes de percement dans le respect des altitudes et de la direction imposées.

aération et à l'évacuation des déblais générés par le creusement du tunnel. Elles doivent rejoindre la galerie du tunnel à une distance préalablement établie. Le transfert de la direction est effectué dans les descenderies par prolongement de l'axe matérialisé au jour au moyen de la méthode décrite à la figure 8. De la même manière que dans le cas du percement depuis un fond de puits vertical, prolonger la direction dans les descenderies depuis une base courte peut être cause d'une notable erreur transversale. Si les deux erreurs se cumulent, alors la jonction de la galerie et de la descenderie risque véritablement d'être problématique.

La progression du travail dans la galerie s'effectue en respectant l'inclinaison prévue lors de la conception de la descenderie. Un instrument de mesure par cultellation, contenant par construction un angle droit dont les côtés présentent un rapport de 1:2.5 (Fig. 8) peut être utilisé à cette fin. L'erreur altimétrique commise à cette occasion est de faible importance, la descenderie et la galerie se rejoignant soit un peu avant, soit un peu après le point de jonction théorique.

Bibliographie:

[1] Peters K.: Tunnelbau und Tunnelabsteckung in der Antike, Fluchtstab 6/ 1964. pp.129-137.

[2] Grewe K.: Der Fulbert-Stollen am Laacher See, Cologne 1979.
 [3] Hundert Jahre deutsche Eisenbahn, Berlin 1938.
 [4] Meyer's Konversationslexikon, Leipzig 1876.
 [5] Schöne H.: Heron von Alexandria Vermessungslehre und Dioptra, Leipzig 1903.
 [6] Grewe K.: Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen, Wiesbaden 1985.
 [7] Héron: Dioptra chap. VIII.
 [8] Héron: Dioptra chap. XV.
 [9] Peters K.: Der Orthogonalzug nach Heron. Eine Analyse der Heronschen Aufgabe im Zusammenhang mit der Absteckung des Eupalinostunnels auf Samos. Verm.-Ing. 6/1988, pp. 189-192.
 [10] Héron: Dioptra chap. VI.
 [11] Peters K.: Nivelliergeräte des Altertums, Verm.-Ing. 3/1987, pp. 97-109.
 [12] Kramer G.: Der Fuciner See, Berlin 1839.
 [13] Peters K.: Der Tunnel – das Eupalineion auf der Insel Samos, Dortmund 1984.

Konrad Peters
 Wiegandweg 63
 D-48167 Münster

Traduction:
 Olivier Reis
 9, rue des Champs
 F-57200 Sarreguemines

Wie? Was? Wo?

Das Bezugsquellen-Verzeichnis gibt Ihnen auf alle diese Fragen Antwort.

WELTMARKE HAFF

Zeicheninstrumente für: Schule - Technik - Vermessung

Bitte verlangen Sie Unterlagen über:
 Demandez la documentation sur:
 Schulreisszeuge / compas pour école
 Gesamtkatalog / Catalogue général
 Planimeter / Planimètre

B.I.S. KOHLER
 Maraîche 11
 1802 Corseaux
 Tel. 021 921 54 19
 Fax 021 922 99 19

Firma / Maison: _____
 Str. Rue: _____
 PLZ Ort / NP Lieu: _____
 Tel. _____