

# L'HISTOIRE DES TUNNELS

## René Waldmann

(Communication à l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Lyon)

### ► L'HISTOIRE DES TUNNELS

René Waldmann, Ingénieur général des Ponts & Chaussées, a présenté le 28 septembre 2004 à l'Académie des Sciences, Belles Lettres et Arts de Lyon, dont il est Membre Titulaire Émérite, cette communication intitulée " L'histoire des tunnels " qu'il nous a autorisés à publier dans notre revue. Il est probable que c'est en 1984, lors de la construction de la ligne D du métro de Lyon et, plus particulièrement avec la difficile traversée du tunnelier franco-allemand sous le Rhône et la Saône, que René Waldmann, alors responsable pour la Semaly de la maîtrise d'œuvre des travaux, commença à se passionner pour les tunnels et les méthodes et outillages qui permettent de les creuser. Cette " Histoire des tunnels " nous est racontée avec l'humour et la passion mais aussi avec l'extraordinaire érudition historique et technique de son auteur, ce qui en rend la lecture captivante du début à la fin.

### ► THE HISTORY OF TUNNELS

On September 28th, 2004, René Waldmann, Senior Engineer in the French Roads & Bridges Corps, presented a paper titled "The history of tunnels" to the Lyon Academy of Sciences and Fine Arts – of which he is a permanent member- and he kindly gave us his agreement to publish it in T&OS.

It is likely in 1984, during the construction of the D Line of the Lyons subway with a difficult double crossing under the Rhône and Saône rivers by the French-German TBM, that René Waldmann, then in charge of the engineering of the works for the Semaly, began to have a real passion for tunnels, their history and the methods and tools used for their construction.

This "History of tunnels" is written with both the humour and passion but also with the extraordinary historical and technical erudition of the author, making its reading exciting from beginning to end.

Il est parfois prétentieux de vouloir écrire l'histoire et j'aurais préféré donner à cette communication un titre plus modeste : " une " histoire des tunnels. Bien des auteurs en effet se sont penchés sur le sujet et je n'ai pas hésité à leur emprunter quelques fragments de leurs travaux.

En revanche, j'ai renoncé à utiliser la source moderne d'information que constitue Internet pour ne pas être submergé et pour donner à mon propos un tour plus personnel.

Je remercie le centre d'études des tunnels (CETu) et surtout son personnel pour la documentation qui m'a été fournie. Cet organisme a été créé à Bron il y a une quarantaine d'années par Jacques Rérolle, ingénieur général des Ponts et Chaussées, dont je salue ici la mémoire et à qui je dois beaucoup dans le déroulement de ma carrière. Je lui associe dans ma reconnaissance deux ingénieurs un peu plus jeunes, Clément Roques, son adjoint et successeur à la direction de l'Équipement du Rhône et Jean Kérisel, professeur de mécanique des sols et expert mondialement connu, dont l'expérience m'a beaucoup servi au cours de la construction du métro de Lyon. La liste de tous ceux qui, en plus de ces trois personnes, m'ont appris mon métier serait trop longue pour vous l'infliger, avec le risque supplémentaire de commettre des oublis.

L'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) publie une revue " Tunnels et Ouvrages Souterrains " qui m'a servi pour mon sujet d'aujourd'hui. J'ai eu l'honneur de présider, de 1985 à 1993, cette association dont le président actuel est Jean Philippe (Ingénieur en Chef, SNCF) qui est fortement impliqué dans la future ligne ferroviaire Lyon-Turin.

Je commencerai par vous parler de l'origine de quelques mots-clés concernant les tunnels.

## 1- DEFINITIONS, ETYMOLOGIES ET MYTHES

Le mot " tunnel " apparaît en 1825. Le dictionnaire encyclopédique de Charles Saint Laurent daté de 1845 donne cette définition :

" Passage souterrain construit sous la Tamise à Londres. Ce passage offre deux conduits parallèles communiquant entre eux par de nombreux portiques. Il est dû à un ingénieur français, M. Brunel, qui a dû vaincre toutes les difficultés d'une si grande entreprise. Au moment où nous écrivons ces lignes, le tunnel est sur le point d'être terminé. "

Tunnel n'est que la traduction anglaise de la " tonnelle ", nom donné à cet ouvrage et utilisé dès le XVI<sup>ème</sup> siècle pour désigner une longue voûte en berceau. Selon Jean Péra, ancien directeur du CETu et ancien président de l'AFTES, la tonnelle dérive elle-même de " tunna ", mot latin populaire d'origine celtique qui désignait d'abord une outre en cuir, puis une grosse futaille.

Ainsi, aucun tunnel digne de ce nom n'a existé avant 1825. Auparavant, les tunnels se nommaient galeries ou mines, selon leur destina-

tion. Les définitions suivantes sont empruntées au petit dictionnaire Robert, pour qui le tunnel est une " galerie souterraine destinée au passage d'une voie de communication (sous un cours d'eau, un bras de mer, à travers une élévation de terrain) ".

L'origine du mot " galerie " est controversée, mais semble provenir du latin médiéval " galleria ", lui-même dérivé de " galilea ", désignant un appendis appuyé sur des colonnes en façade des basiliques romaines. La galerie est un " lieu de passage, beaucoup plus long que large, ménagé à l'extérieur ou à l'intérieur d'un édifice ou d'une salle ". C'est aussi un " chemin souterrain ou couvert, pratiqué par l'assiégeant pour s'approcher d'une place ou pour l'exploitation d'une mine " et le sens s'élargit à " tout passage souterrain (boyau, tunnel, catacombe) " et pour finir " petit souterrain creusé par divers animaux ".

Quant à la " mine ", le terme serait d'origine celtique (mina). Certains estiment que le mot " mine " dérive de l'égyptien " mna " signifiant la pépite d'or qui servait à échanger des biens, d'où est venue la " monnaie ". Dès le XIV<sup>ème</sup> siècle, la mine est le terrain où se trouve le

minerais, exploité par des carrières, des minières et des filons. Plus tard, c'est une galerie de sape, une excavation pratiquée sous un ouvrage pour le faire sauter, d'où encore plus tard d'autres sens liés à l'explosif.

Pour en revenir au mot tunnel, le dictionnaire encyclopédique universel Hachette de 1998 ajoute à ce qui précède le sens de "galerie aveugle de certains dispositifs techniques", comme les tunnels de soufflerie, les anneaux d'accélérateurs de particules, les fours à tunnel, etc.

Les physiciens nomment "effet tunnel" un phénomène selon lequel une particule possède une probabilité non nulle de franchir une barrière de potentiel d'énergie supérieure à la sienne.

Il semble que le premier écrivain ayant utilisé le mot tunnel soit Stendhal dans les "Mémoires d'un touriste" en 1838, pour désigner le passage souterrain des Echelles construit sous Napoléon I<sup>er</sup>.

Ce mot nouveau est d'ailleurs en italique dans le texte. Il fut rapidement adopté dans le domaine des chemins de fer naissant à cette époque.

Citons pour terminer des expressions donnant au tunnel une connotation péjorative, comme "voir le bout du tunnel" ou "sortir du tunnel", ce qui tendrait à aller dans le sens de certains aspects mythiques des tunnels.

De nombreux symboles sont associés au tunnel, le souterrain étant à la fois image de vie (la terre-mère) et de mort (lieu de ténèbres). Dans la Genèse comme chez les Aztèques, le souterrain est siège du mal, alors que d'autres populations le considèrent comme un lieu sacré (cavernes peintes du Caucase, de l'Inde et de la Chine).

Le tunnel incarne la transition entre l'intérieur et l'extérieur (la Porte des dieux de Babylone), la liaison entre les trois niveaux cosmiques (terre, ciel et enfer). Le monde souterrain est associé à la métallurgie (Vulcain dieu des enfers). Il est aussi symbole de l'inconscient, l'obscurité de la finalité intérieure s'opposant à la lumière de la dispersion dans le monde (Wagner dans Tristan).

Le tunnel apparaît aussi comme un refuge contre les dangers du dehors, les cavernes contre les bandits et les tunnels de métro contre les bombes. Depuis le tunnel de Londres où s'entassèrent les Anglais durant la dernière guerre, les métros ont souvent eu un rôle stratégique, tel celui de Moscou, et de protection des populations urbaines, la fameuse "défense passive". Certains métros sont même conçus pour résister à une bombe atomique de moyenne puissance, comme à Singapour.

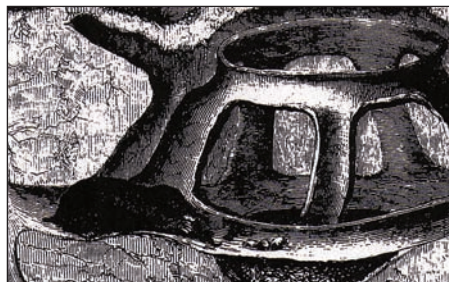
Citons enfin les mythes anciens liés au sous-terrain : la caverne de Platon, l'enlèvement de Proserpine, la descente d'Orphée aux enfers, la légende de l'Atlantide, et bien d'autres.

La littérature, la peinture, la musique et le cinéma ont constamment utilisé le thème du tunnel, naturel ou construit par l'homme. On nous pardonnera de ne pas citer d'exemple. La construction d'un tunnel est bien souvent une grande aventure humaine : il faut avoir vécu la vie d'un chantier, ses péripéties et ses accidents, ses drames parfois et ses joies lorsque la montagne est percée, lorsque deux équipes se rencontrent après avoir foré par les deux bouts. Arrêtons ici le lyrisme pour passer à l'histoire.

## 2 - L'HISTOIRE ANCIENNE

### • La préhistoire

Avant l'apparition de l'homme, les galeries souterraines étaient le fait de la nature ou des animaux (figures ci-après). La grotte de Zhoukoudian en Chine a été occupée entre - 460 000 et - 230 000 par l'Homo Erectus Pekinensis. Les effondrements successifs du toit de cette grotte au cours des millénaires ont chassé progressivement les occupants vers la sortie, ensevelissant des débris d'os et d'outils, témoignages de la croissance du volume des crânes et de la dureté des outils.



L'Homo Sapiens Sapiens a sans doute commencé à creuser le sol pour chercher l'eau, creusement vertical créant des puits, avant de se lancer dans le creusement horizontal, plus périlleux, pour la recherche des minéraux.

La plus ancienne mine connue serait située au Swaziland sous la colline de Bomvu (- 40 000), creusée à la main avec des pierres aiguisées pour extraire l'hématite, ou "pierre de sang", qui fournissait la couleur rouge liée aux rites mortuaires de l'homme de Néandertal. Nous laisserons tomber ce brave homme qui n'a pas eu -on le suppose- de descendance, pour notre ancêtre de Cro-Magnon dont les talents nous sont connus notamment par les peintures polychromes des grottes d'Altamira et de Lascaux (-30 000). Il a dû se procurer du rouge en des lieux plus proches que le Swaziland.

Il existe en Europe de nombreuses mines de silex datant du néolithique (- 15 000).

Le creusement avec des os apparaît vers • 10 000. On trouve en Belgique un squelette de mineur enseveli par un éboulement, son outil d'os à portée de main.

On utilisait aussi des racloirs en bois de cerf et des pelles formées d'une omoplate de boeuf. Les premières mines de sel datent de • 3 500 ans en Autriche et en Pologne (Wieliczka), ainsi que le cuivre en Arménie et plus tard en Égypte.

Les Égyptiens trouvèrent aussi l'or natif dans la vallée des Rois. Cet or était utilisé comme monnaie dans l'antiquité sous le nom de "mna" dont il vient d'être question. Les autres métaux "mous" comme le plomb, l'argent, l'étaient sont tirés de mines diverses dans le pourtour méditerranéen, exploitées notamment par les Phéniciens et les Étrusques vers • 1 200. D'où les alliages conduisant au bronze. Enfin le fer apparaît vers - 1 500.

L'outillage se perfectionne : les silex laissent place à des scies de cuivre sans dents, mais garnies d'abrasifs comme la poudre de corindon, puis à de vraies scies en fer. Pour faire éclater la roche, l'homme utilise ensuite le chauffage au feu, suivi de refroidissement à l'eau, parfois additionnée de vinaigre. On trouve des traces d'incendie dans la mine de Mitterberg au Tyrol, exploitée entre -1600 et -800. Ce procédé n'était pas sans danger. Le marinage (enlèvement des déblais) se faisait sur des plateaux de bois portés à dos d'homme. On s'éclairait chichement avec des torches en résine ou en peau graissée. Pas de ventilation, bien sûr. Pline décrit la mort rapide des travailleurs extrayant l'arsenic dans la mine de Pinolisa à Pontus.

### • De - 1 000 au début du Moyen-âge

Désormais, nous concentrerons notre propos autour des ouvrages souterrains destinés à la communication et au passage, laissant de côté, en dépit de leur intérêt, les ouvrages souterrains parfois considérables comme les chambres funéraires, les habitations, les silos, etc.



Mais nous ne ferons pas usage du mot " tunnel ", pour les raisons que j'ai exposées.

Le passage sous l'Euphrate, reliant le palais de Sémiramis au temple de Babylone daterait de - 2 000, mais pourrait n'être qu'une légende car aucun vestige ne subsiste de cet ouvrage décrit par Diodore de Sicile.

Les qanats, conduites souterraines pour captage des eaux apparaissent en Perse vers - 900. Ce sont des galeries drainantes percées en pente douce vers les vallées, avec des puits servant à la ventilation et à l'extraction des déblais.

La Bible nous apprend que Josué avait joué de la trompette autour des murailles de Jéricho, mais il avait aussi pris soin de percer une galerie sous les tours, étayée par des madriers auxquels il mit le feu, provoquant la chute des remparts de façon certainement plus efficace que la musique. La piscine de Siloë à Jérusalem était alimentée par une galerie souterraine (- 700), le " tunnel " d'Ézéchias, long de plus de 500 m et destiné à soustraire les sources aux Syriens.

Des galeries servent aussi à des fins militaires pour assiéger et s'emparer des villes (siège de Apollonia en Illyrie en -214), ou en sens inverse pour permettre aux assiégés de se sauver (défense de Hattusas, cité hittite, relatée par Vitruve).

L'Égypte fut maîtresse durant des siècles de la technique des ouvrages souterrains. Crocodilopolis était une ville souterraine reliée au Nil par un passage entre le lac Farun et le fleuve. Les ruines de cette ville, décrite par Hérodote, furent découvertes en 1813.

Hérodote cite aussi comme une des trois merveilles du monde grec la galerie de 1 036 m de long dans l'île de Samos construite par Eupalinos (- 530), servant à alimenter l'île en eau (fig. ci-après).



Cet aqueduc fonctionna durant un millénaire, puis servit de refuge aux habitants de Samos contre les invasions au VII<sup>ème</sup> siècle, fut oublié et redécouvert en 1853 par Victor Guérin. Thalès de Milet mentionne en -558 une galerie souterraine de détournement du fleuve

Halys pour permettre sa traversée par les armées de Darius.

En Grèce, les ouvrages souterrains construits par la civilisation mycénienne (source de Persée, Tholos d'Atrée, nécropole des rois) furent détruits par les invasions doriennes en - 1 200, mais Athènes et Corinthe (- 600 à - 400) construisent, outre de nombreux ouvrages de captage d'eau, les premiers égouts, sur leur territoire et en Asie mineure (Lycie et Comagène).

Citons aussi les souterrains liés aux habitations troglodytiques nombreuses en Inde (Cachemire) et en Chine. Ce dernier pays construit aussi des qanats et le gigantesque Grand Canal (début en - 215) dont le parcours de plus de mille kilomètres sans écluse comporte de nombreux ouvrages souterrains.

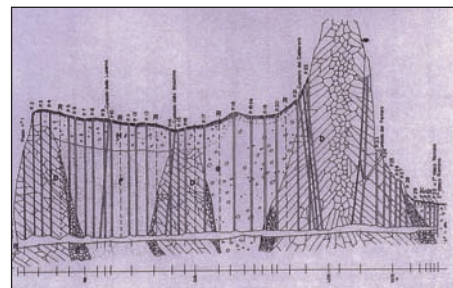
Les ouvrages romains sont fort variés. Avant l'essor de Rome, la civilisation étrusque avait déjà donné naissance à des ouvrages de drainage, les " cuniculi " (- 500), ainsi que des mines de cuivre et de fer traités au port de Populonia. Notons au passage que le petit lapin se dit " cuniculus " et que les Italiens ont conservé ce nom de " cuniculi " pour désigner les petites galeries de reconnaissance préconisées pour mieux connaître les terrains avant de forer un tunnel.

Les Romains ont construit chez eux et dans tout leur empire quantité d'ouvrages souterrains, parfois en rocher sans soutènement, mais le plus souvent en maçonnerie avec voûte. Ces maçonneries étaient édifiées sans l'aide de cintres, mais avec des formes de terre. Ils connaissaient aussi le boisage, en particulier pour les galeries de mine et de siège. Leur technique a été décrite par Vitruve (- 30).

Ils construisirent plusieurs galeries servant de trop-plein ou de drainage de lacs parfois marécageux, tels les lacs Albano, Nem et Ariccia (- 500 à - 400). Plus tard, sous l'empereur Claude (51), un spectacle organisé pour l'inauguration de la galerie du lac Fucino tourna au désastre, comme le relate Tacite. En voici un bref compte rendu :

"L'empereur avait invité des milliers de spectateurs massés sur les collines dominant le lac pour voir s'affronter dans un combat naval 19 000 hommes embarqués sur des trirèmes et des quadrirèmes. C'étaient des criminels en service commandé, ce qui leur accordait la vie sauve. Après le spectacle, il était prévu de vidanger le lac dans le fleuve Garigliano au moyen d'une galerie de 4 500 m traversant le mont Liris, creusée sous le règne de César.

La tâche avait mobilisé 30 000 hommes durant onze ans. Il avait fallu creuser 35 puits



(fig. ci-dessus) au fond desquels les équipes construisaient des tronçons de galeries qui se rejoignaient pour former un passage continu, souvent en zigzag, car le guidage par laser n'était pas encore au point."

Mais le jour du spectacle, lorsque le dernier bouchon de terrain eût sauté, la vidange ne s'opéra pas entièrement car la galerie n'arrivait pas exactement au fond du lac. Il subsista une cuvette sur laquelle fut improvisé un spectacle de gladiateurs montés sur des pontons, pendant que les ouvriers s'affairaient à approfondir la galerie. Résultat : la cuvette se vidangea brutalement, les eaux emportèrent tout sur leur passage, causant une onde de choc qui faillit renverser la cour impériale. Agrippine s'en prit violemment au chef de chantier, un certain Narcisse, l'accusant de mal-façons et de corruption. Lequel ne se laissa pas démonter et dénonça le caractère emporté de la reine et son ambition démesurée...

La galerie d'Agrippa sous le mont Pausiello entre Naples et Pouzzoles (- 36 selon Strabon) serait le premier " tunnel " routier de l'histoire. Deux charrettes attelées pouvaient s'y croiser.

La galerie de Fuerlo sous Vespasien mérite aussi d'être signalée.

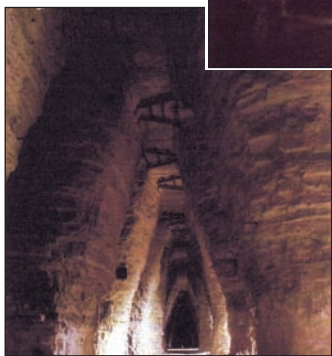
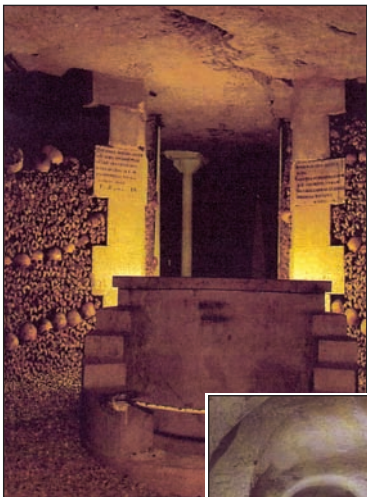
Les égouts romains sont nombreux, parmi lesquels le fameux " Cloaca maxima " de Rome, entrepris vers - 550, en grande partie à l'air libre, puis remblayé. Aussi connus sont les aqueducs romains répandus dans de nombreux sites, avec de multiples sections souterraines en général peu profondes, séparées par des ponts célèbres de nos jours (le pont du Gard et les aqueducs de Lyon entre autres). D'intéressantes études ont été menées sur les vestiges de souterrains de Venelles (Aix en Provence) et les conduits hydrauliques de la ville de Grand dans les Vosges.

- **Le Moyen âge**

Entre la fin de l'Empire romain et la Renaissance, peu d'innovations sont à noter dans la technique de construction des " tunnels ". Dans la région parisienne, dès l'époque gauloise, les exploitations de minéraux se pratiquaient à flanc de coteau, sur la montagne Sainte Geneviève pour le calcaire et sur les buttes-témoins pour le gypse. Les Romains, qui ignoraient le

plâtre, l'ont adopté en faisant la conquête de la Gaule. Lorsque l'épaisseur des terrains de recouvrement à déblayer devint trop importante, à partir du XII<sup>ème</sup> siècle pour le calcaire et du XVII<sup>ème</sup> siècle pour le gypse, les exploitations se sont poursuivies en souterrain, surveillées par les agents royaux, car le roi percevait une dîme en vertu de son droit régalien. Henri IV supprima cette dîme en 1601 ainsi que les contrôles, ce qui entraîna de graves désordres jusqu'à une loi de 1810 interdisant l'exploitation souterraine à Paris.

Durant des années, les carrières souterraines se relièrent entre elles par des tunnels, puis furent progressivement abandonnées et transformées en champignonnières et même en " catacombes " pour recaser les ossements du cimetière des Innocents à la veille de la Révolution (figures ci-après).



On relève dans le monde méditerranéen quantité d'ouvrages remarquables, telle la cité refuge de Derinkaya dans le Cappadoce, les passages souterrains des châteaux forts et autres tunnels stratégiques. La naissance de l'Islam favorisa la recherche de l'eau, d'où les qanats médiévaux et les " khetaras " d'Afrique du nord. La citerne de Yerebatan à Constantinople est un " palais souterrain "

contenant 80 000 m<sup>3</sup> d'eau (construite sous Constantin et agrandie par Justinien en 532).

En France, l'égout de Ménilmontant, le plus ancien de Paris, date de 1370. Le premier tunnel routier serait celui du col de Tende (1450), suivi de près par celui du col de la Traversette (1480).

A ce propos il faut signaler que ce tunnel du Tende, sans autre ventilation que les flux alternatifs de l'air entre la France et l'Italie, a donné des sueurs froides aux pouvoirs publics car, 500 ans plus tard, on découvrit que le trafic automobile croissant amenait une concentration de gaz nocifs telle qu'un automobiliste en panne pour un quart d'heure au milieu de l'ouvrage (le temps de changer une roue, par exemple), avait toute chance d'être asphyxié !

Georgius Agricola publia en 1556 le traité des mines " De re metallica ", source inépuisable de données techniques et d'illustrations sur les travaux souterrains (fig. ci-dessous).



## • Les XVII<sup>ème</sup> et XVIII<sup>ème</sup> siècles

La technique fait un pas décisif avec l'utilisation de la poudre pour faire exploser la roche (1627), puis un autre avec l'invention de la mèche qui réduit le risque d'accident.

La construction du canal du Midi par Riquet (1680) donne naissance au tunnel de Malpas, premier canal souterrain pour la navigation (fig. ci-dessous).

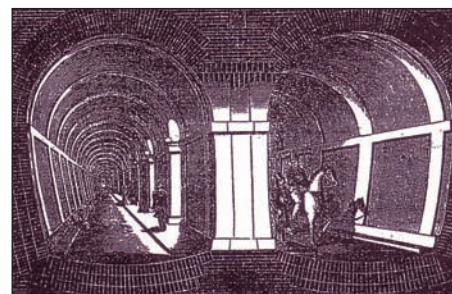


C'est le début du siècle des canaux, qui s'achèvera vers 1840 avec le canal du Nivernais.

La mine de Daroca, près de Saragosse, (600 mètres de long), est sans doute le premier ouvrage destiné à protéger la ville des inondations dues aux pluies torrentielles.

## • Le XIX<sup>ème</sup> siècle

C'est le siècle des chemins de fer et des tunnels dignes de ce nom, bien que la " Tonnelle " de Londres, construite à partir de 1825, ait été destinée aux piétons et aux voitures à cheval (fig. ci-dessous).



Le premier tunnel de chemin de fer (avec traction animale) est celui de Terrenoire en 1826 sur la ligne de Roanne à Andrézieux, suivi de celui de la ligne de Liverpool à Manchester en 1830 (avec traction à vapeur). Commence alors en France la construction de longs tunnels : Blaisy (4 100 m en 1846) entre Paris et Dijon, la Nerthe entre Vitrolles et Marseille (4 617 m en 1848), tous deux avec 22 puits intermédiaires, et les grands tunnels lyonnais. Le premier est Saint Irénée (2 100 m) réalisé entre 1853 et 1855 avec six puits intermédiaires, puis Saint Paul (1 402 m), entre 1871 et 1875. Celui de Saint Clair (2 403 m) est achevé en 1890.

Un aide-mémoire des ingénieurs et architectes (Dunod - 1867) fixe les dimensions des tunnels ferroviaires " La largeur entre les pieds-droits est fixée à 8 m et la hauteur sous clef à 5,5 m. Il convient qu'un homme puisse se tenir debout sur l'impériale; or, les diligences les plus élevées ayant 2,80 m, si l'on compte 2,20 m pour l'homme de grande taille avec son chapeau, on voit que la distance des rails à l'intrados ou aux sous-poutres doit être de 5 m au moins ".

Le chemin de fer ne se limita pas aux liaisons entre les villes. Le premier chemin de fer intérieur à une ville fut inauguré en 1863 à Londres, reliant Paddington à King's Cross.

La construction fut confiée à la compagnie " Metropolitan Railway ". Cette liaison prit tout naturellement le nom abrégé de " Metro ". Elle comportait 6 kilomètres de souterrain à deux voies et 7 stations. Les travaux débutèrent



rent en 1860 et, malgré les difficultés du site, ils furent achevés en trois ans seulement.

Les 4 stations d'extrémité étaient en surface, les trois centrales en souterrain à fleur de sol, l'une d'elles était éclairée par des dômes de verre, ancêtres des pyramides du Louvre. Les galeries furent creusées le plus souvent en tranchée dans l'axe des rues, car le passage sous des immeubles était pratiquement impossible : la loi anglaise ignorait l'expropriation pour cause d'utilité publique et les propriétaires avaient droit au tréfonds jusqu'au centre de la terre ! Restait évidemment l'achat à l'amiable au prix fort et la démolition. Le passage dans les rues nécessita le déplacement du fouillis inextricable des réseaux de services publics. On imagine la curiosité des Londoniens durant les travaux !

L'inauguration eut lieu le 10 janvier 1863 en présence du Premier Ministre Palmerston. Ce fut un grand succès, avec près de 10 millions de passagers la première année, 12 en 1864. Les trains, longs de 72 mètres, comportaient trois classes, tous les passagers devant être assis ! Ceux qui craignaient le froid pouvaient louer des bouillottes.

Il y avait cependant un gros problème, celui de l'évacuation des fumées : durant le parcours souterrain, entre les stations, les locomotives mettaient la vapeur " en bouteille ", ce qui bridait évidemment l'énergie de traction. Puis les chauffeurs relâchaient la vapeur et les fumées en station, où de puissants ventilateurs les aspiraient. Cependant les mauvaises odeurs dues aux frottements des freins sur les roues (les sabots étaient en bois) mécontentaient le public : il fallut en plus évacuer l'air vicié dans les tunnels par des aérateurs sous voie publique.

Le premier tunnel transalpin est celui du Mont Cenis, construit entre 1861 et 1870 au prix de grandes difficultés, surmontées par les progrès décisifs réalisés à cette occasion dans le domaine de la perforation par machines à air comprimé et à vapeur : au cours des trois premières années, on n'avait avancé que de 725 m sur un total de 13 690 m à creuser. On employa la méthode dite allemande pour la perforation, consistant à commencer par une galerie à la partie inférieure du tunnel définitif.

Ce tunnel devint international au cours des travaux, la Savoie ayant été rattachée à la France en 1860.

Suivirent peu après les tunnels du Saint Gothard (15 000 m entre 1874 et 1882), de l'Arlberg (10 000 m forés en trois ans), et surtout du Simplon creusé entre 1898 et 1905, qui détint longtemps le record du monde de longueur avec 19 731 m.

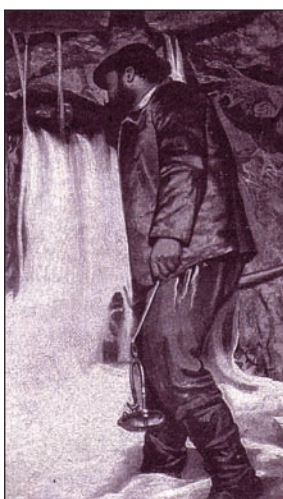
Le Saint Gothard fut attaqué par une première galerie au niveau de la voûte supérieure du futur tunnel, élargie ensuite avant l'attaque du massif inférieur. Pour l'Arlberg, on attaqua simultanément les galeries haute et basse, avec des cheminées verticales les reliant, disposition très favorable pour la ventilation.

Le Simplon comportait un seul tube accompagné d'un évitement central de 500 m en son milieu, plus une galerie de base préparatoire au deuxième tube, foré plus tard entre 1912 et 1921.

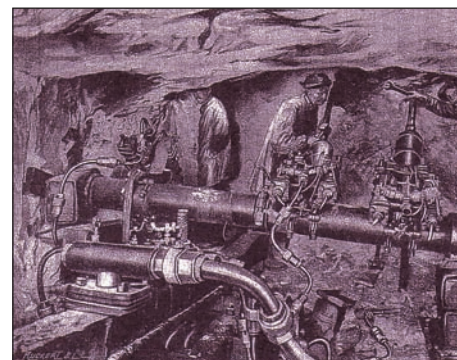
Au mont Cenis et au Saint Gothard, pour réduire la longueur à percer, les voies ferrées montaient le plus haut possible jusqu'au tunnel de faite par une série d'ouvrages d'art. Au Simplon, on décida au contraire de percer à basse altitude pour éviter ces coûteux ouvrages d'art.

L'histoire du Simplon est émaillée d'incidents et d'accidents, sources d'enseignements et de progrès dans plusieurs domaines, notamment celui de la sécurité des chantiers. Les trois principales difficultés venaient des sources multiples à haute pression (la couverture atteignait 2 177 m), de la chaleur qui dépassait 48 degrés au centre du tunnel, et de la ventilation insuffisante cause de plusieurs cas d'asphyxie.

On rencontra 237 sources dont le débit maximum, côté italien, atteignit 1 500 litres par seconde, ce qui faillit faire abandonner les travaux : on mit un an pour avancer de 40 m ! (fig. ci-dessous)



Pour lutter contre la chaleur, faute de puissance des ventilateurs qui aspiraient l'air frais (!) par la galerie annexe, on eut recours à la vaporisation d'eau au front de taille. Malgré cela, le chantier fut très pénible. Les machines foreuses utilisant l'air comprimé et l'eau sous pression avaient encore fait de nouveaux progrès (fig. ci-après).



La galerie de Chedde mise en service en 1896 fut la première galerie hydroélectrique de France et peut-être du monde. On pourrait presque considérer comme le premier tunnel routier français la grotte du mas d'Azil en Ariège, aménagée en route impériale en 1859 sans que les blocs de la voûte ne dégingolent malgré les 41 coups de canon tirés à 300 m pour en tester la fiabilité.

Pour quitter l'Europe et le XIX<sup>ème</sup> siècle, il faut signaler un ouvrage remarquable construit aux États-Unis entre 1869 et 1871, les deux tunnels de 20 km sous la rivière de Chicago, qui servirent dès leur achèvement de refuge aux habitants lors du grand incendie qui détruisit la ville. C'est aussi aux États-Unis que fut employée pour la première fois la nitroglycérine dans le tunnel de Hoosac.

## 3 - L'HISTOIRE MODERNE

### • Première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle

Commençons par une singularité : le tunnel du Rove, large de 22 mètres, creusé entre 1911 et 1927 pour la navigation entre l'étang de Berre et la mer, et désaffecté suite à un éboulement qui s'est produit en 1963.

L'année 1900 vit s'ouvrir le métro de Paris, le septième du monde, après ceux de Londres, New-York, Chicago, Budapest, Glasgow et Vienne. Il sera suivi de 12 autres jusqu'en 1935, année où Staline inaugura le magnifique métro de Moscou. Plus aucun métro ne sera construit entre 1936 et 1950, les quelques années d'avant et d'après la deuxième guerre mondiale.

Les techniques de forage se perfectionnent avec des machines de plus en plus puissantes, la mise en oeuvre d'explosifs plus efficaces, l'utilisation de cintres et de boucliers, le traitement des terrains difficiles par injections ou congélation. Pour les revêtements, la maçonnerie en pierre est remplacée par le béton et les voussiers en fonte ou en béton. On prend de mieux en mieux en compte l'aération et l'éclairage, mais pas encore tellement la sécurité contre les incendies.

Puis les tunnels routiers remplacent ceux de chemin de fer, d'abord aux États-Unis.

Le premier véritable tunnel français est celui de Saint Cloud (1946), suivi par le tunnel de la Croix Rousse à Lyon inauguré en 1952.

## • Deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle

L'Europe va s'efforcer de suivre l'exemple des États-Unis dans le domaine des voies routières rapides, puis des autoroutes, car le trafic automobile se développe à vive allure. En France et en Italie, on construit le tunnel du Mont Blanc entre 1955 et 1962, le plus long du monde avec 11 600 m et le premier à ne pas passer sous un col routier, mais sous un massif montagneux, le plus haut d'Europe.

La décompression du rocher au cours du forage se traduit par des éclatements violents des parois qu'il fallut souvent boulonner. Ce phénomène de " pression de rocher " avait déjà été observé au Simplon. Le record de longueur est bientôt battu par le tunnel du Fréjus (12 868 m) et encore plus par le tunnel suisse du Saint Gothard (16 918 m) achevés tous deux en 1980.

En 1970 une conférence internationale tenue à Washington sur les recommandations de l'OCDE aboutit à la décision des vingt nations participantes de créer des associations nationales pour le progrès des travaux en souterrain. L'association française AFTES, déjà citée, se groupa avec les autres associations pour former en 1974 l'Association internationale des travaux en souterrain (AITES) dont le secrétariat fut assuré par la France jusqu'à une date récente.

Ces associations aux structures fort diverses selon les usages nationaux regroupent des maîtres d'ouvrage, des bureaux d'ingénierie et d'architecture, des universitaires (enseignants, chercheurs et étudiants), des entrepreneurs de travaux publics et des fabricants de matériels. La liste n'est pas close. Leurs publications, leurs groupes de travail et leurs réunions ont beaucoup contribué aux grands progrès réalisés depuis quelques décennies dans le domaine des travaux en souterrain.

*Parmi ces progrès, il faut citer :*

- les améliorations dans les études et les travaux préalables à la construction des tunnels : géologie, géophysique, reconnaissance et traitement des terrains.
- le creusement des terrains durs à l'explosif.
- les machines à attaque ponctuelle et à pleine section, les haveuses, les jumbos, etc.
- les dispositifs de protection à l'avancement : cintres, boucliers, béton projeté, injections, qui conduisent à des méthodes de foration de plus en plus performantes et sûres.

- les équipements techniques : ventilation, éclairage, signalétique, télécommunications, galeries de secours, etc. Les incendies sont désormais la préoccupation majeure des exploitants et des concepteurs.

Une place spéciale doit être réservée aux tunneliers, nés dans les années 1960 avec les travaux de galeries hydroélectriques, puis illustrés par le fameux bouclier de la Défense, sur le RER parisien.

Précisons que le terme " bouclier " est limitatif, et désigne seulement la partie avant du tunnelier qui sert à maintenir le terrain en place autour du trou en cours de foration. Le tunnelier est une machine composée d'un bouclier complété par des moyens d'excavation, de soutènement, d'extraction des déblais et souvent de mise en place du revêtement définitif du tunnel.

D'abord limités aux terrains durs, les tunneliers sont devenus opérationnels dans des terrains difficiles, meubles et aquifères, grâce aux vertus de la bentonite et des mixtures qui en dérivent. Sans aller trop loin dans les considérations techniques, il faut préciser que la bentonite est une argile à grains très fins susceptible de former des gels aux propriétés étonnantes.

Les Lyonnais connaissent bien les " parois moulées " utilisées pour la construction de la première ligne du métro de Lyon. Grâce à la faculté de la bentonite d'équilibrer la poussée des terres en milieu aquifère très perméable, il fut possible de construire dès 1974 les parois verticales des tunnels sans faire tomber ou même fissurer les immeubles riverains. Peu de temps après, les ingénieurs japonais présentèrent aux journées d'études de l'AFTES à Paris une curieuse maquette d'un bouclier capable de creuser dans les mêmes terrains perméables et aquifères des tunnels horizontaux en poussant un volume de boue bentonitique à l'avant du dispositif de creusement. Je me souviens du scepticisme amusé des congressistes devant le stand japonais : cela relevait de l'utopie et ne pouvait en aucun cas fonctionner en vraie grandeur et dans la réalité, car la bentonite perdant ses propriétés de gel solide dès qu'on la remue, le terrain ne pouvait que s'effondrer. Les Japonais répondaient en souriant aux critiques et essayèrent en vraie grandeur ce qu'on allait baptiser " tunnelier à la boue ". Et cela marcha très bien : les expériences successives couronnées de succès obligèrent les ingénieurs à inventer d'autres théories, pendant que les Japonais multipliaient les chantiers, prenant ainsi une avance technique considérable en ce domaine.

Le monde entier les imita, les ingénieurs et les entrepreneurs allemands, anglais, américains, puis français, italiens et espagnols (sauf

omission) inventèrent des variantes, parmi lesquelles le fameux tunnelier franco-allemand qui réussit la traversée du Rhône et de la Saône en 1985 pour la ligne D du métro, après bien des vicissitudes qui n'en donnèrent que plus de prix à la victoire finale.

Actuellement, les tunneliers constituent une gamme d'engins étonnamment variés, capables de creuser et de revêtir avec une automatisation poussée des tunnels dont la section peut dépasser 150 m<sup>2</sup>. A l'opposé, les microtunneliers sont de plus en plus utilisés, en ville notamment, pour mettre en place ou réparer des conduites souterraines de faible section sans éventrer les rues.

Certains tunnels sont réalisés par éléments préfabriqués et immergés dans les rues (métro de Rotterdam) ou dans la mer (métro de San Francisco). D'autres au moyen de tranchées soit ouvertes à l'air libre et recouvertes, soit réalisées par la méthode de " cut and cover " (métro de Lyon rue Victor Hugo). Ce tour d'horizon technique est volontairement limité : de plus amples développements ne manqueraient certes pas d'intérêt, mais pour une autre communication à caractère plus scientifique.

En fin de siècle, voici le point de la situation dans les divers domaines où se réalisent les tunnels.

## • Métros

Au cours de la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle 83 nouveaux métros ont été construits dans le monde, alors qu'il n'en existait que 19 en 1950. C'est la conséquence à la fois de l'expansion urbaine croissante, de l'accroissement des moyens de financement et du souci des pouvoirs publics d'offrir aux citadins un moyen de transport capable de concurrencer l'automobile, dont les effets nocifs en ville commencent à se faire sentir.

La quasi-totalité de ces métros sont souterrains, à faible profondeur, ce qui coûte moins cher en travaux d'infrastructure proprement dite, mais nécessite le déplacement de nombreux réseaux de services publics, ou à moyenne profondeur, ce qui permet de passer sous les immeubles et d'améliorer les tracés, mais renchérit le coût des accès. Pour cette dernière raison, on a abandonné -peut-être temporairement- la construction à grande profondeur (plus de 30 m) dans des terrains imperméables, comme ce fut le cas dans les argiles de Londres et de Moscou.

Certains métros sont aériens, comme celui de Manille, mais ceci est hors de notre propos.

D'autres ne portent pas le nom de " métro ", mais s'en rapprochent beaucoup et comportent de nombreux tunnels : ce sont les " métros légers " ou " light rail transit " et les



" pré-métros ", de plus en plus répandus dans le monde en raison de leur coût inférieur à celui des vrais métros, qui sont intégralement en site propre.

Les quatre lignes du métro de Lyon pourraient constituer une anthologie des tous les procédés de construction en souterrain, avec leurs incidents et les enseignements qui en résultèrent.

## • Chemins de fer

Le tunnel ferroviaire japonais du Seikan entre Honshu et Hokkaïdo, construit laborieusement entre 1964 et 1988 à plus de 250 m sous la mer, détient le record de longueur absolu avec 53 850 m, suivi de peu par le tunnel sous la Manche achevé en 1993 (50 500 m).

Le tunnel du Groene Hart, sur la ligne de TGV entre Rotterdam et Amsterdam, vient d'être achevé en 2004. Sa construction utilisa le plus large tunnelier du monde (14,87 m de diamètre) dont voici quelques autres caractéristiques impressionnantes (fig. ci-dessous) :



**masse totale** : 3 350 tonnes (la moitié de la masse de la tour Eiffel), dont 1 900 pour le bouclier et 1 450 pour le train suiveur, long de 120 m.

**puissance totale installée** : 15 mégawatts

**poussée maximum sur la roue d'attaque** : 18 000 tonnes (ou 180 méganewtons)

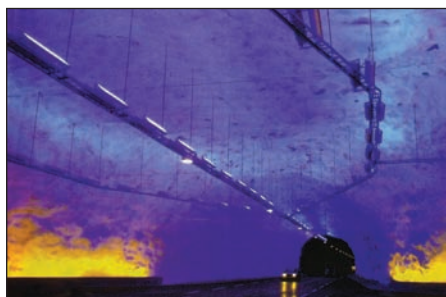
En site urbain, le tunnel parisien Eole reliant les lignes SNCF des gares du Nord et de Saint Lazare constitue une prouesse compte tenu de l'encombrement du sous-sol et des nombreux édifices sous lesquels il passe. Dans plusieurs grandes villes ont été aussi réalisées les jonctions souterraines entre lignes de chemins de fer ayant leurs terminus dans des gares plus ou moins périphériques en cul-de-sac, comme Bruxelles, Milan, Londres etc.

Aujourd'hui, parmi les 22 plus longs tunnels ferroviaires existant dans le monde, 13 sont situés au Japon, 4 interfrontaliers européens, 3 en Suisse, 1 en Italie et 1 aux États-Unis.

La Suisse a entrepris dès la fin du siècle la construction de deux tunnels ferroviaires de base : le Saint Gothard, qui battra avec 57 000 m le record de longueur du Seikan, et le Lötschberg (34 600 m).

## • Routes

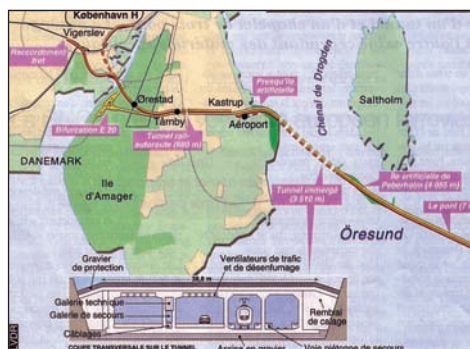
Le plus long tunnel routier du monde est celui de Laerdal, inauguré en 2001, sur la liaison vitale entre Oslo et Bergen, les deux plus grandes villes de Norvège. Sur les 24 500 m de son parcours, des aires de détente avec éclairage bleuté sont ménagées pour vaincre le stress des automobilistes (fig. ci-après).



Le second est le tunnel suisse du Saint Gothard (16 918 m, ouvert en 1980). Suivent les tunnels de l'Arlberg en Autriche (13 972 m), du Fréjus et du Mont Blanc, déjà cités.

En site urbain, un autre record de tunnelier (14,20 m de diamètre) est détenu par le tunnel de Lefertovo sur l'autoroute circulaire de Moscou, réalisé par une entreprise française entre 2001 et 2003. Même diamètre pour le tunnel sous l'Elbe à Hambourg.

Deux ouvrages mixtes, fer et route, sont exceptionnels. Le Grand Belt qui relie l'île de Copenhague au continent au moyen d'un pont-tunnel géant de 17 500 m, dont la mise en service en 1997 a bouleversé le trafic des voyages intérieurs au Danemark. L'Oresund, reliant le Danemark et la Suède, formé d'un tunnel immergé de 3 500 m relié à un pont de 8 000 m par une île artificielle longue de 4 000 m. Ce dernier ouvrage, inauguré en 1999, permet de relier Copenhague et Malmö en un quart d'heure par tous les temps (fig. ci-après).



## • Autres tunnels

L'assainissement des villes est un domaine essentiel qui exige un équipement de plus en plus complet en réseaux d'égouts comportant des souterrains de tous diamètres qu'on appellera encore " tunnels ". Le tunneliers de moyen diamètre (2 à 6 m) sont de plus en plus utilisés.

Il existe enfin des tunnels servant à d'autres types de transport. Les tunnels du CERN sous la Suisse et la France véhiculent des particules qui ignorent les frontières. En Chine les gigantesques aménagements hydrauliques du Yang Tsé comportent des tunnels hydrauliques de 20 m de diamètre.

Au Japon, les déversoirs d'orage de Tokyo sont les plus grands collecteurs d'eaux pluviales au monde.

Leur coût astronomique est équilibré par celui des sinistres immobiliers qu'ils permettent d'éviter lors des inondations dues aux pluies diluviennes.

## 4 - LES GRANDS PROJETS

A court terme, on l'espère, trois tunnels seront construits sur la liaison autoroutière Anse-Balbigny, déclarée d'utilité publique en avril 2003 : un au droit de Violay et 2 au droit de Tarare.

C'est une bonne nouvelle pour les Lyonnais désirant aller en Auvergne et vers l'Atlantique.

En Europe, un programme de réseau de transport vient d'être voté par le Parlement. Il prévoit un ensemble de liaisons rapides, rail et route, qui comporteront plusieurs tunnels importants, parmi lesquels le tunnel sous le mont d'Ambin de la future ligne TGV Lyon-Turin est l'un des plus désirés par notre région. Les premiers travaux ont commencé, mais le financement de l'ensemble reste à boucler.

Les tunnels sous les détroits de Gibraltar, de Messine et du Bosphore sont à l'étude depuis nombre d'années. Les considérations économiques et politiques conditionnent évidemment leur lancement. Certains projets prévoient des tunnels flottant entre deux eaux, qui seraient moins coûteux que les tunnels immergés ou forés à grande profondeur sous la mer. Idée à suivre...

En Suisse, un projet semble encore bien utopique : le " Swiss metro ", réseau de chemins de fer souterrains intervilles à grande profondeur et grande vitesse (4 à 500 km/h), avec propulsion et sustentation électromagnétique.

tique et vide partiel en tunnel pour diminuer les dépenses d'énergie de traction.

Sur le plan des techniques de forage des tunnels, de nouveaux progrès sont à attendre, surtout dans le domaine des tunneliers où l'aptitude de traverser des terrains difficiles et hétérogènes ne cesse de se perfectionner. Rappelons que Lyon a sans doute inauguré le premier tunnelier " mange tout " pour la traversée de la Saône et de la colline de Caluire

par la liaison autoroutière entre A6 et le boulevard périphérique.

Les progrès les plus sûrs concernent les coûts de ces tunneliers, dont le nombre dépasse plusieurs milliers dans le monde, avec la naissance d'un marché d'occasion.

L'utilisation du sous-sol profond dans les villes est une conception qui se développe, surtout dans les pays à très forte densité urbaine, où les 20 à 40 premiers mètres du

sous-sol sont fortement encombrés par toutes sortes de cavités et de tuyaux. Au Japon, une loi récente permet désormais l'expropriation des terrains sous immeubles, ce qui ouvre des perspectives nouvelles et quelque peu futuristes pour ce pays qui n'a pas fini de nous étonner.

Et dans le reste du monde ? L'urbanisme souterrain est-il pour demain ? Peut être...

## BIBLIOGRAPHIE •••••

- 1- **José Antonio Junca Ubierna** : El Tunel §1 Historia y Mito. Editores : Colegio de ingenieros, canales y puertos - Madrid 1990
- 2- **Jean Kérisel** : Histoire de l'industrie géomécanique jusqu'à 1700, Livre d'or du 50ème anniversaire de la Sté Internationale de mécanique des sols et des travaux de fondations. Éditions Balkema San Francisco 1985
- 3- **Carlos Lopez Gimeno** : Manuel de Tuneles y obras subteraneas - Madrid 1997
- 4- **Georges Reverdy** : Petite histoire des tunnels, Culture technique n°26 - Revue du ministère de l'Équipement - Paris 1992
- 5- **Bertrand Rouvillois** : La fabuleuse histoire des tunnels alpins. Article publié dans " La Vie du rail " n°2368 - Paris 1992
- 6- " **Tunnels et ouvrages souterrains** " - Organe officiel de l'Association française des travaux en souterrain - Articles de Pierre Duffaut, Jean Péra, Robert Longelin
- 7- **Remerciements particuliers à Mme Rétif**, du service de documentation du C.E.Tu (Centre d'études des tunnels - 25 av. François Mitterrand - 69500 - Bron)



**Cage en fibre de verre assemblée et prête pour être descendue dans la tranchée et renforcer les parois d'une gare située au long de la route du tunnelier. La même technique a été utilisée pour les puits d'installation et d'extraction du tunnelier. Dimensionnement et calculs du renforcement en fibre de verre ont été effectués par Sireg, en suivant les recommandations A.C.I Committee 440.**

## DURGLASS® soft-eye technique



20043 ARCORE (MI) -I- Via del Bruno, 12  
Tel. +39 039.62.70.21 - Fax +39 039.61.59.96  
e-mail: [geotecnica@sireg.it](mailto:geotecnica@sireg.it) - <http://www.sireg.it>