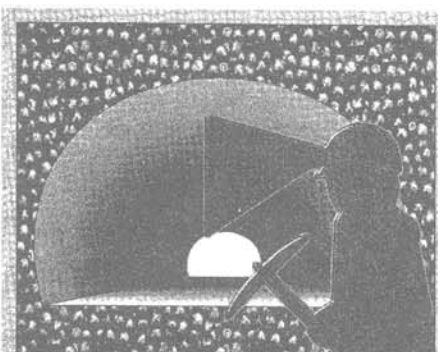
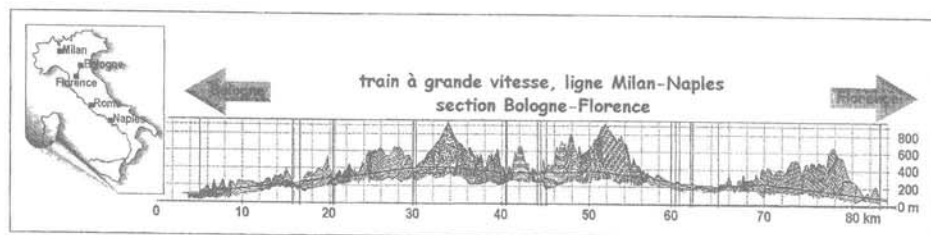


LA LIGNE À GRANDE VITESSE BOLOGNE-FLORENCE AVANCEMENT DES TRAVAUX SOUTERRAINS



La construction de la ligne ferroviaire à grande vitesse de Bologne à Florence constitue l'un des principaux exploits du génie civil à l'aube du 21^e siècle. L'ensemble du projet représente 73 kilomètres de tunnels, c'est-à-dire que plus de 90% du tracé sera souterrain. Cet article décrit les principaux caractères des travaux souterrains, en insistant sur trois zones typiques de la chaîne des Apennins.



Profil en long de la section Bologne-Florence

Les grandes chaînes de montagnes sont des barrières naturelles que les voies de communication franchissent difficilement. Depuis les débuts de l'histoire de l'humanité, leur équipement en réseaux de transport efficaces a toujours requis l'accomplissement d'exploits remarquables. Ainsi dès le temps des Consuls romains, la traversée des Apennins a joué en Italie un rôle historique et culturel de premier plan. Le développement de nouveaux itinéraires accompagne l'évolution sociale et culturelle de la péninsule, avec des ouvrages d'art toujours plus importants et d'une technologie plus exigeante.

Au seuil du troisième millénaire, le projet de *Treno Alta Velocità* (TAV, le TGV italien) a été conçu pour s'intégrer au réseau européen de chemins de fer à grande vitesse. Le réseau ferré d'Italie est redessiné, avec quadruplement des lignes principales et de nouveaux tracés, parmi lesquels le tronçon Bologne-Florence constitue le défi majeur tant en études qu'en travaux.

Pour respecter les paramètres d'une ligne à grande capacité et de technologie avancée dans le respect rigoureux de l'environnement, la ligne est souterraine sur plus de 90% de sa longueur, avec 73 kilomètres en neuf tunnels et seulement 5 kilomètres à l'air libre, sans tenir compte des accès aux gares de Bologne et de Florence qui sont aussi principalement en souterrain.

Impensable il y a peu d'années, une telle conception souterraine n'est possible aujourd'hui que grâce au développement de nouvelles méthodes d'études et d'exécution : l'industrialisation de l'avancement par la mise en œuvre de matériels toujours plus puissants assure la sécurité du chantier et le respect des délais.

La coupe géologique est complexe et variée, depuis les formations rocheuses des flyschs et argilites jusqu'aux argiles et terrains de couverture meubles. Pour faire face à cette hétérogénéité, les projecteurs de *Fiat Ingegneria* et de *Rocksoil* ont appliqué la technologie la plus moderne, avec des moyens de soutènements adaptés à chaque type de terrain.

C'est une particularité du travail en souterrain qu'il faille abattre le terrain au front et mettre en place une structure de revêtement. Le comportement du tunnel, à court terme et à long terme, dépend de la façon dont le terrain réagit à l'ensemble de ces actions. Le projecteur doit donc affecter à chaque terrain les quantités et les phasages des moyens et méthodes de soutènement, afin que le contour de l'excavation reste stable pendant l'avancement. À cette condition, une méthode unique d'avancement en pleine section peut être employée.

Dès 1992 la référence a été la méthode Adeco-RS en introduisant les technologies innovantes disponibles à ce jour [1-2-3-4]. Le projet a partagé le tunnel en sections de caractéristiques géotechniques homogènes appartenant à trois catégories :

- catégorie A, le front est stable ;
- catégorie B, le front est stable à court terme ;
- catégorie C, le front est instable.

Et il comprend le détail des sections types avec leur domaine d'application.

La description de chaque section type, sur les bases géologiques et géotechniques les plus probables, conduit à une méthode d'exécution unique, où les moyens de soutènement et leurs quantités sont définis, sans rien laisser à modifier au niveau du chantier. Les déformations admissibles sont spécifiées pour chaque section type, dans chacun des terrains où elle est prescrite. Dans ce domaine admissible,

TABLEAU I
Légende des coupes géologiques

(Ndt. : les shales, marls et quelques autres mots sont difficiles à traduire avec précision, le Macigno est intraduisible, le Mugello est une petite région naturelle ; la distinction des nombreuses formations locales a peu d'intérêt pour les non géologues et les étrangers)

Série Eopliocène de Ligurie-Emilie	EmB formation Bismantova EoL formation Loiano EaB formation Bismantova Eps Pliocène supérieur Epi Pliocène inférieur EGSg formation gypso-sulfatée EmS Schiavona	marnes et marnes gréseuses grès et conglomérats grès conglomérats et grès peu cimentés sables et silts peu cimentés marnes à gypses marnes silteuses
Série Ombrie-Romagne	RMA formation marno-gréseuse	lits alternés de grès, silts et marnes
Série Ligure	LC complexe chaotique OL olistostromes LaM formation Monghidoro	schistes argileux grès et marnes schisteuses
Série Subligure Allochtone	SPF Pietro forte SSI formation Sillano ScM formation Monte Morello SAP schistes argileux de Pescino SVR formation Villa a Rodo	grès, calcaires et marnes schistes argileux, calcaires et grès calcaires, calc. marneux et gréseux schistes argileux
Série Toscane Autochtone	TMM Macigno du Mugello TM Macigno Tmv marnes versicolores TMG formation Castel Guerinio	lits de silts, de grès et de marnes grès à lits de silts et de schistes schistes argilo-marneux grès, marnes et marnes silteuses
Bassins en extension	BM formation bassin du Mugello aBM schistes argileux du Mugello cBM conglomérats et éboulis dt éboulements de terrain	
Symboles		

l'intensité des moyens peut varier dans des limites préétablies (figure 2), mais en dehors de leurs limites il faut adopter une autre section type.

Au cours des travaux, le projeteur adapte en temps réel les moyens de soutènement aux résultats d'auscultation du terrain, conformément aux prévisions. Plusieurs cas se présentent suivant la comparaison des données prévues et rencontrées :

- si les conditions rencontrées sont conformes aux prévisions, on continue la même section type ;
- si les conditions sont légèrement différentes mais restent compatibles avec le domaine de variation du comportement prévu, on prescrit l'une des variantes de la section type ;
- si les conditions sont les mêmes mais pas à l'endroit prévu, on adapte le choix de la section aux conditions rencontrées ;
- si les conditions sont notablement différentes, on réexamine le projet pour choisir une autre section type.

Cette façon de faire permet d'atteindre trois objectifs. Le projet est assez détaillé pour s'adapter aux caractéristiques réelles du terrain ; toute incertitude sur la qualité du travail est éliminée ; les non conformités liées à l'insuffisance de représentativité des données sont évitées.

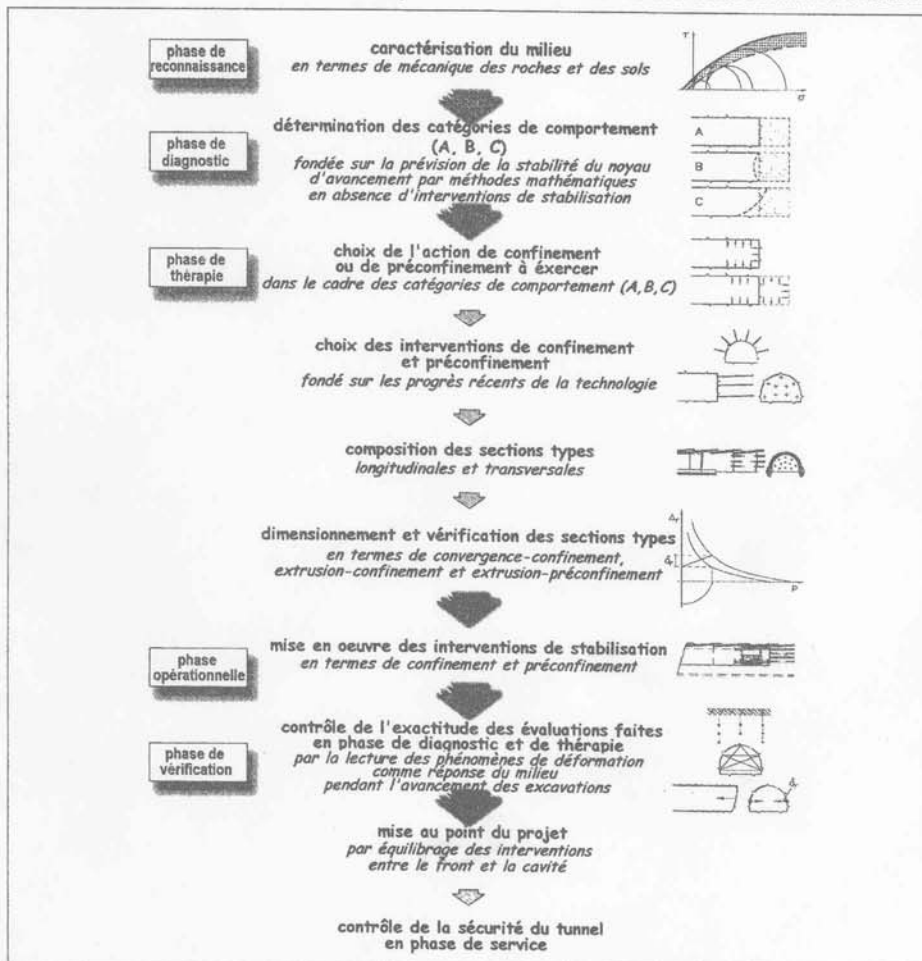
La méthode Adeco-RS est systématique et organique, deux caractères essentiels pour l'application de l'assurance qualité [5]. Sa structure en phases successives laisse place de façon claire aux points de contrôle (réexamens et vérifications) nécessaires à la validation de l'ouvrage. En outre, au point de vue de l'exécution, la méthode d'avancement à pleine section qui est proposée (130 à 140 m² excavés) apporte l'avantage considérable d'une mécanisation des travaux ; et la fermeture immédiate en radier de l'anneau de soutènement apporte des avantages considérables pour la stabilité du tunnel, à court et à long terme.

Les travaux souterrains

Les études se sont achevées en juillet 1995 et le marché de travaux a été signé entre TAV, maître d'ouvrage et Fiat-Cavet, entreprise générale, avec démarrage immédiat. Les principaux tunnels sont décrits ci-dessous, et plus particulièrement trois tronçons caractéristiques des Apennins (trois fronts sur les vingt-six en activité). En particulier on traitera la traversée d'une zone à émission de gaz, une grande zone de glissement de terrain et une zone avec une nappe en charge. Ce sont trois passages particulièrement difficiles qui représentent actuellement les problèmes majeurs qui ont été rencontrés.

Sept des neuf tunnels sont décrits ici du nord au sud, de Bolgne à Florence, leurs longueurs et couvertures sont données par le tableau I,

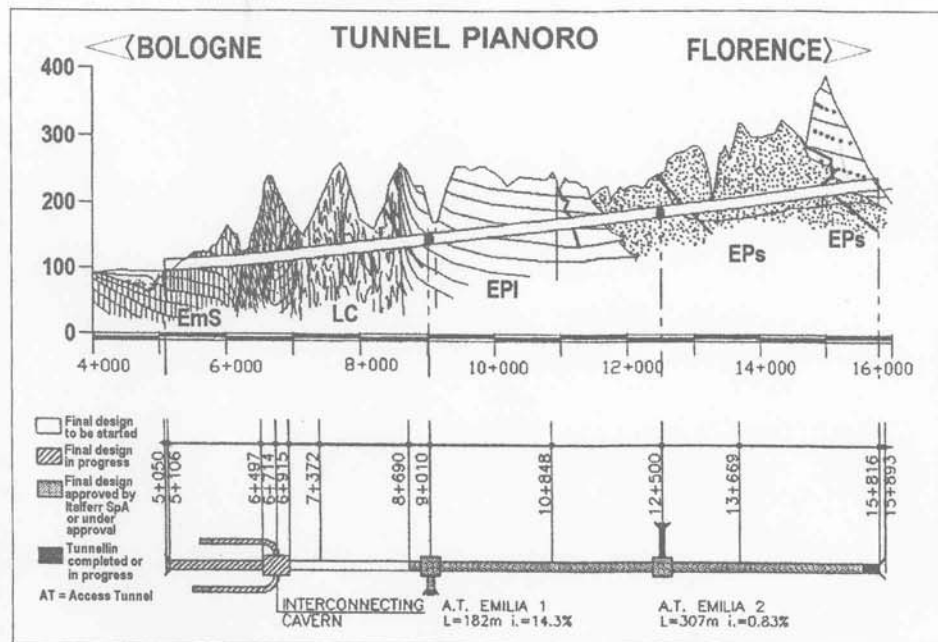
Conception et construction des tunnels selon la méthode Adeco-RS



le plus long atteint 18 kilomètres, la couverture paraît modeste, avec un maximum de 500 mètres, mais c'est beaucoup pour des roches tendres. Le tableau II énumère les formations et roches traversées, dont les symboles sont repris dans le texte et sur les figures. La plupart sont des roches tendres de la fin du Tertiaire, toujours tectonisées ; les olistostromes sont des blocs ou écaillés allo-gènes à l'intérieur de certaines formations.

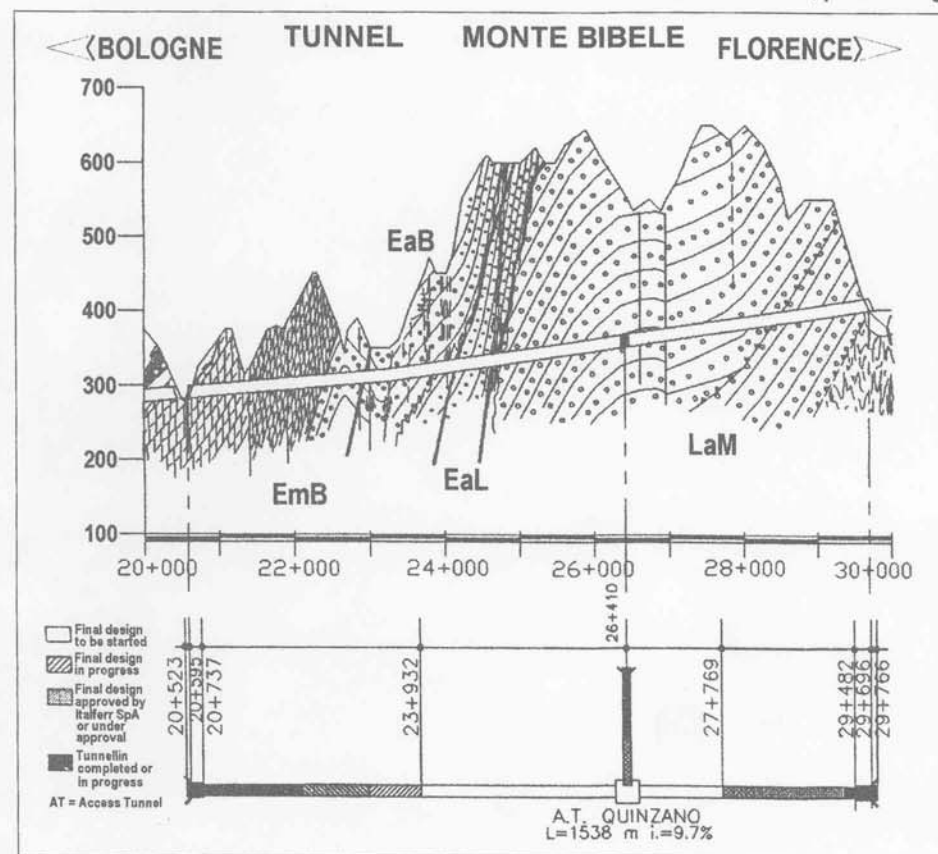
Tunnel Pianoro

Long de 10705 mètres, il passe à travers les reliefs situés à l'est de la route nationale Futa, avec une couverture maximale de 170 mètres (en moyenne 90 m). À partir du nord, les terrains traversés sont les marnes Ems, les argiles du complexe chaotique LC, et les terrains des séries intrapenniniques inférieure et supérieure, Epi et EPs. Entre les



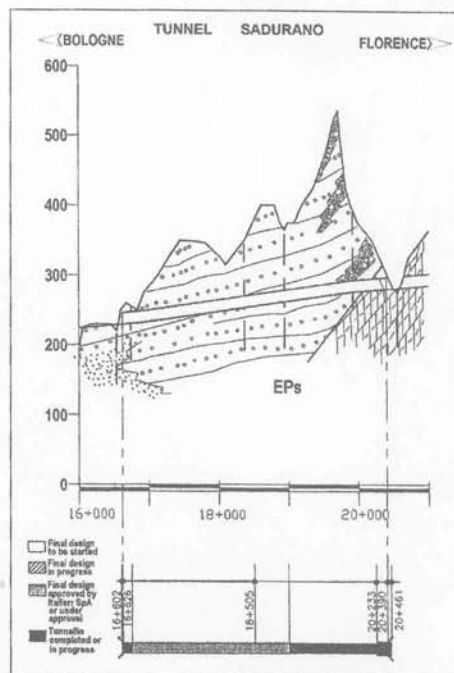
Tunnel Pianoro, profil en long

Tunnel Monte Bibele, profil en long



points 6,497 et 6,914 est prévu le raccordement à la ligne « directissime » Florence-Bologne, qui requiert l'exécution d'une grande caverne. Deux fenêtres, Emilia 1 et 2, rejoignent le tracé aux points 9,015 et 12,500.

Tunnel Sadurano



Tunnel Sadurano, profil en long

Au sortir du tunnel Pianoro la ligne chevauche l'incision du Rio Laurenziano, franchit le Rio Crocione et entre à nouveau en tunnel au point 16,601. Là commence le tunnel Sadurano, long de 3855 mètres, avec une couverture maximale de 250 mètres (en moyenne 80 m). Les terrains appartenant au Pliocène supérieur Eps, et sont constitués de grès et conglomérats peu cimentés.

Tunnel Monte Bibele

Au débouché du tunnel Sadurano (point 20,456) la ligne franchit par un pont-caisson de 67 mètres l'incision du Rio Cani et revient en souterrain pour 9243 mètres. Le tunnel Monte Bibele passe sous le sommet de même nom avec une couverture variable de 50 à 280 mètres. Du portail nord au point 24,700 les terrains traversés appartiennent aux formations miocènes des marnes de Bismantova EmB, intercalées vers le point 23,000 avec des grès à grain fin ; ensuite la formation Monghidoro, LaM. Cette formation de la série Ligure a les caractères d'un flysch très tectonisé, renfermant des poches d'eau et de gaz méthane sous pression. Au kilomètre 26,400 arrive la fenêtre Quinzano (1547 mètres), entièrement dans la formation Monghidoro. Le tunnel s'achève au point 29,766 à l'altitude 402, le point le plus haut de la ligne en surface.

Le 18 janvier 1999 la fenêtre Quinzano a traversé au point métrique 507 une zone conte-

nant du méthane sous pression (la figure 6 donne les mesures). La loi italienne impose l'emploi exclusif de matériels antidéflagrants et l'évacuation du tunnel si la concentration dépasse 1%. Aussi le tunnel a été évacué avant la mise en œuvre complète des cintres et du béton projeté.

Comme le terrain très tectonisé avait un comportement élastique-fragile, il aurait fallu placer rapidement le soutènement primaire et secondaire pour assurer la stabilité du tunnel (catégorie B, front stable à court terme seulement). Faute de pouvoir le faire, les mineurs ont constaté en revenant au front environ une heure plus tard, un éboulement de 200 mètres cubes (comme le montre la figure 7). Après dépassement de la limite élastique, la résistance du terrain tombe rapidement à une valeur résiduelle. La rupture modeste du front et des piédroits va s'étendre à une large zone plastique dont la déformation augmentera si on ne la confine pas rapidement.

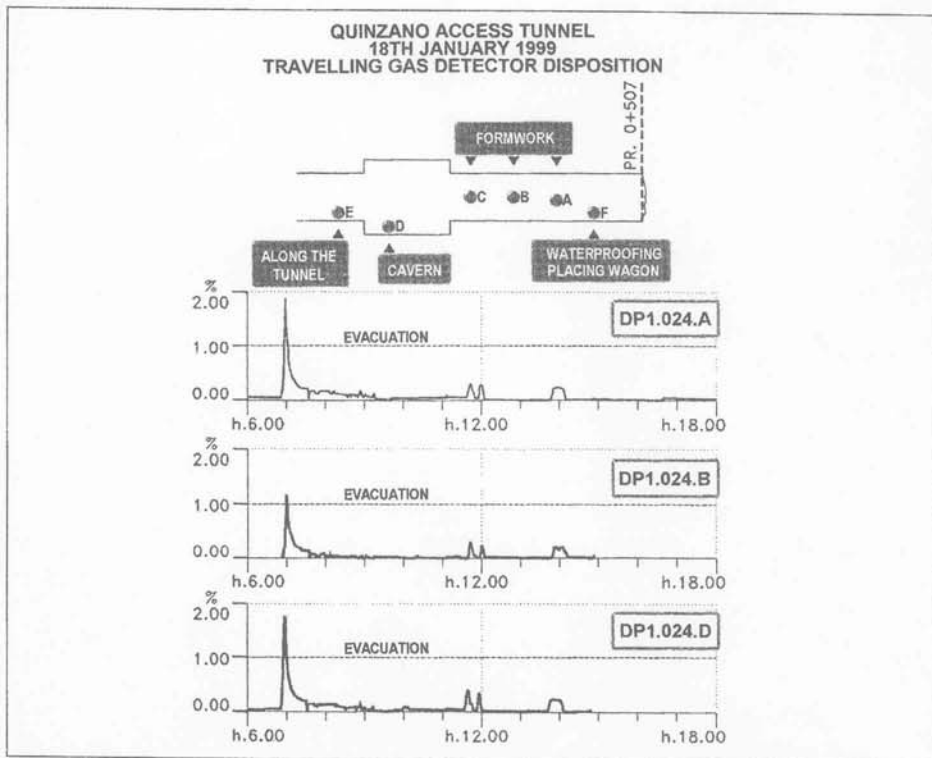
En examinant la déformation du terrain on constate le développement de la dilatance au contour de l'excavation et si ce volume n'est pas contenu il va refluer inévitablement dans le tunnel.

Comme la menace de venues de gaz est toujours présente, l'entrepreneur doit prendre la responsabilité du risque ou bien garantir un délai de stabilité plus long par un présoutènement surdimensionné.

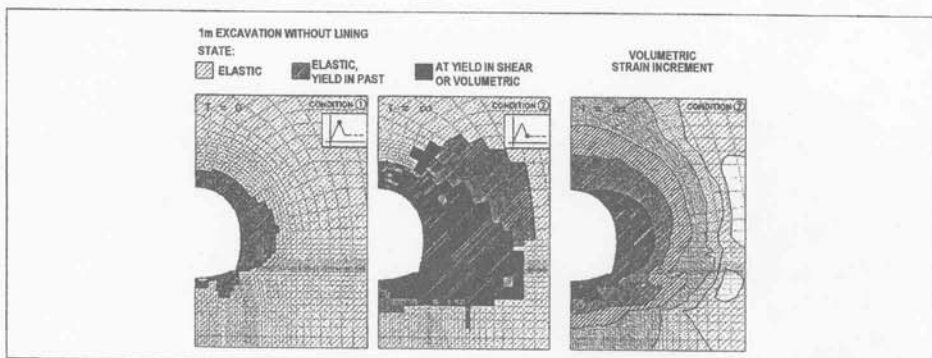
Tunnel Raticosa

Au kilomètre 29,982 commence le tunnel Raticosa, long de 10450 mètres, qui contient le point culminant de la ligne à la cote 413,5. Sur environ 4 kilomètres, il traverse les terrains du Complexe chaotique LC, des argilites fortement fracturées et tectonisées. C'est la première fois que ces terrains sont traversés sous une couverture de 200 à 500 mètres, et donc sous contraintes élevées. Le reste est dans les flyschs de la formation marno-gréseuse RMA. Les fenêtres Osteria et Castelvecchio le rejoignent aux points 32,515 et 35,325, longues de 1325 et 1150 mètres respectivement.

Le portail nord se trouve dans une large zone de glissements de terrain anciens constitués de débris argileux englobant des blocs calcaires de moins d'un mètre cube. Cette zone, qui intéresse le tunnel sur 500 mètres environ, est constituée de coulées successives dont la plus profonde remonte à environ 3000 ans, et la plus récente au début du siècle. Les études du glissement conduites par *Fiatingegneria* depuis 1995 ont séparé trois couches où les vitesses de solifluxion sont différentes : dans la couche la plus superficielle la vitesse horizontale est supérieure à 4 millimètres par an, dans la couche intermédiaire, elle est comprise entre 4 et 1,5 mm/an, et dans la couche inférieure elle est inférieure à 1,5 millimètre par an. Dans un contexte aussi délicat (front instable, catégorie C) la section type

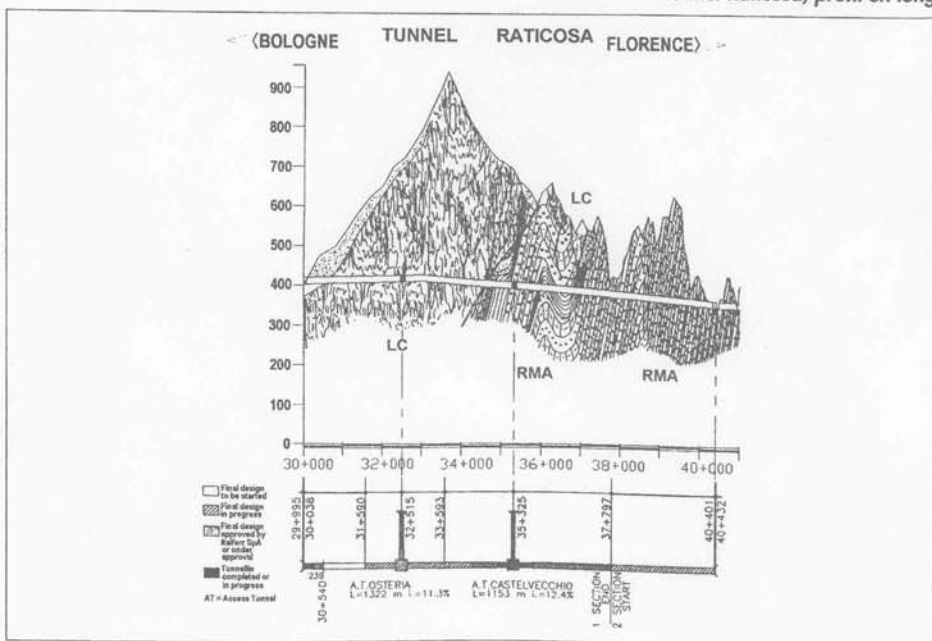


Tunnel d'accès Quinzano. Suivi des gaz au point kilométrique 0+507



Tunnel d'accès Quinzano. Stabilité du front

Tunnel Raticosa, profil en long

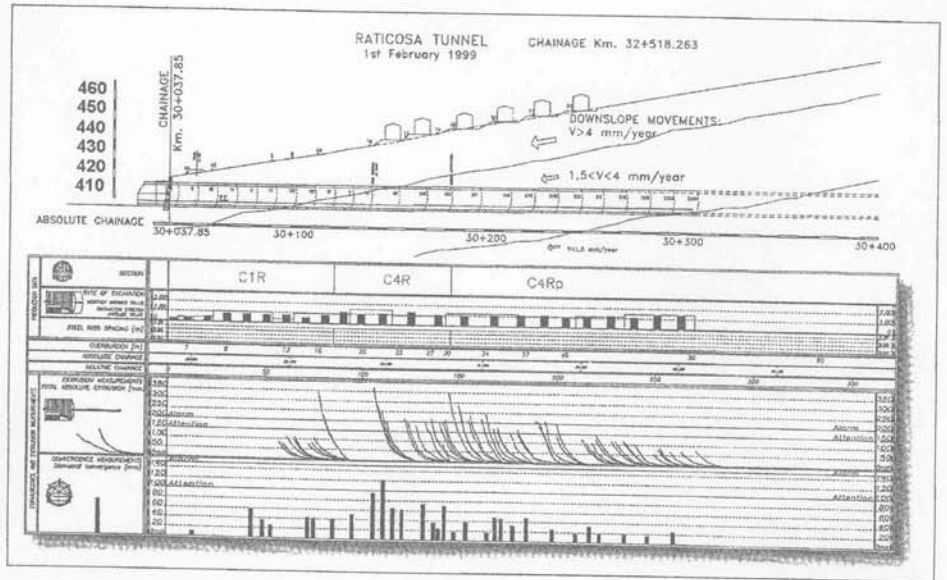


mise en œuvre comporte un fort raidissement du noyau frontal avec des boulons en fibre de verre et la pose immédiatement après l'excavation d'un pré-revêtement en calotte et radier constitué de cintres et de béton projeté fibré. Le bétonnage des piédroits et du radier en béton armé suit à 6 mètres du front, celui de la calotte à 50 ou 60 mètres. La consolidation du noyau frontal est assurée par une centaine de boulons de fibre de verre longs de 22 mètres, renouvelés tous les 12 mètres d'avancement.



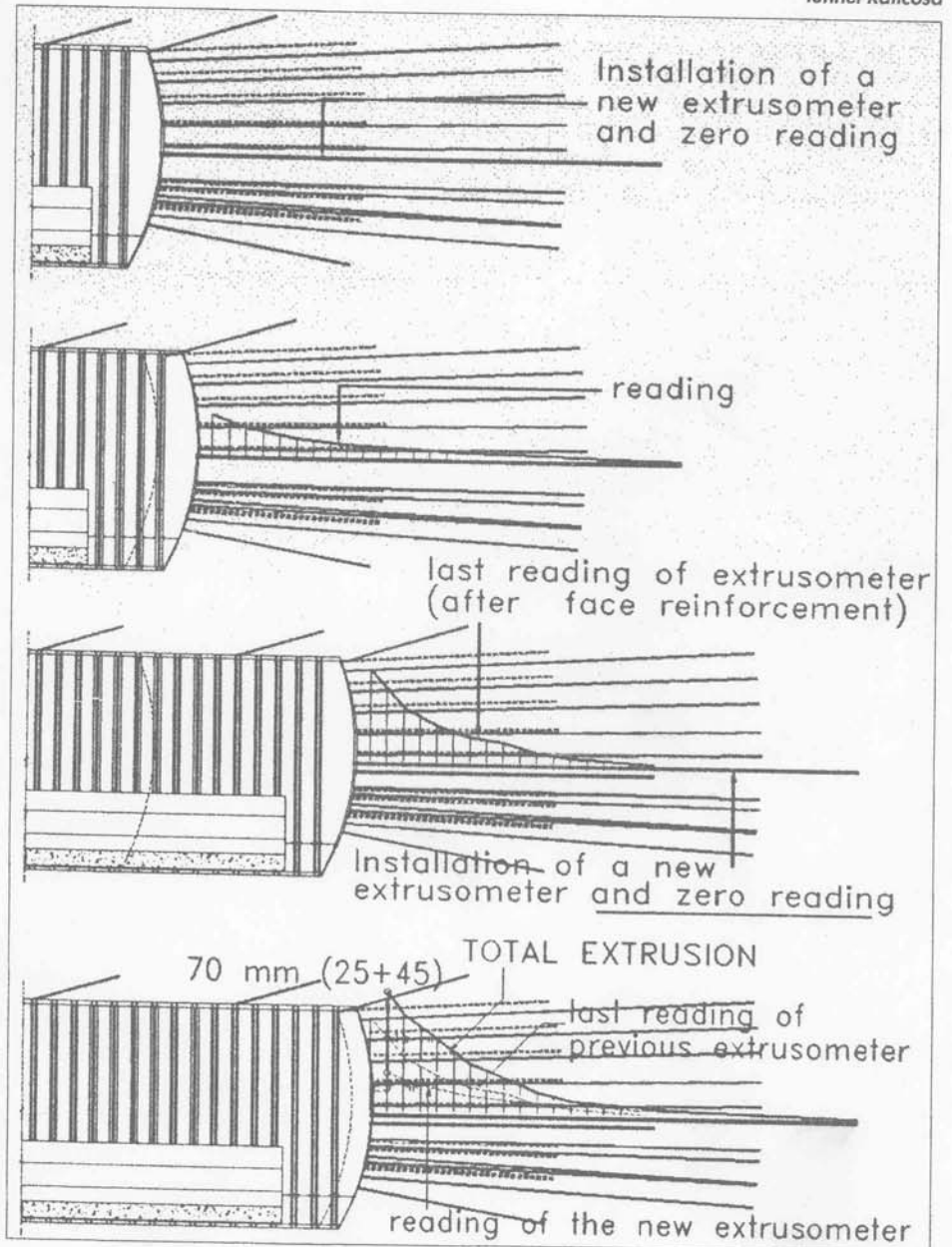
Tunnel Raticosa, renforcement des terrains

Dans une situation aussi complexe, la mesure systématique de l'extrusion du front est essentielle pour définir la longueur des phases de creusement. L'objectif est d'empêcher que la déformation du terrain atteigne la valeur résiduelle de la résistance, ce qui conduirait à l'éboulement. Il a été nécessaire de mettre en place, à chaque phase d'avancement, un « extrusimètre » de 20 m de long (type *sliding deformer*) pour mesurer la déformation longitudinale du terrain au front. De cette façon on obtient l'extrusion totale en ajoutant l'extrusion mesurée sur le nouvel appareil à la dernière lecture de l'appareil précédent. On mesure aussi l'extrusion différentielle sur deux bases placées à 1 mètre de distance. Les valeurs ainsi mesurées doivent rester en dessous de 5 %, limite au-delà de laquelle commence la chute de résistance. Ce critère permet, à chaque avancement, d'adapter la longueur, l'intensité et le chevauchement des boulons de pré-soutènement, ainsi que la longueur des passes d'avancement et le bétonnage du radier. Au fur et à mesure de la pénétration dans le glissement, il a été possible d'alléger progressivement les interventions, et d'allonger à 11 m les passes d'avancement et de bétonnage du radier.



Tunnel Raticosa, suivi de l'entrée nord

Tunnel Raticosa



Tunnel Scheggianico

À la sortie du tunnel Raticosa, la ligne traverse en viaduc la profonde vallée du torrent Diaterna, puis entre dans le tunnel Scheggianico au point 40,542. Long de 3558 mètres sous une couverture qui atteint 300 mètres, celui-ci est entièrement dans la formation Marno-gréseuse (RMA). Les fenêtres Brenzano et Brentana (longueurs 140 et 237 mètres) l'atteignent aux points 41,170 et 43,250 respectivement. À sa sortie, vers le point 44,100, il passe sous la route nationale d'Imola avec seulement 1 mètre de couverture.

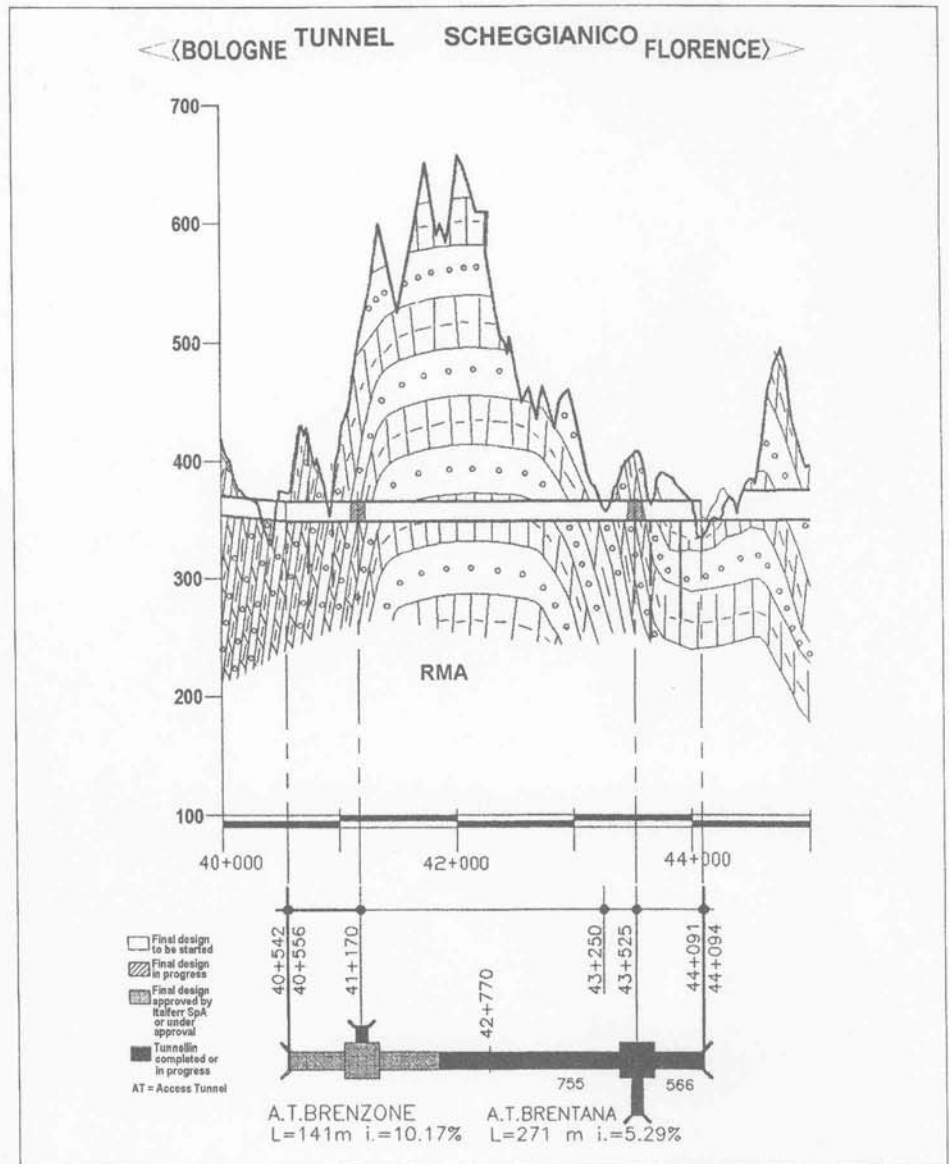
Tunnel Firenzuola

La vallée de la rivière Santerno est franchie par un viaduc, à l'extrémité duquel se trouve la voie de garage de San Pellegrino, au point 44,279, à mi-chemin entre Bologne et Florence, et après 740 mètres commence le tunnel Firenzuola, de 14339 mètres (après être passé sous le torrent Rovigo). Le portail sud est proche du circuit automobile du Mugello (Imola). La couverture maximale dépasse 500 mètres. Les terrains traversés jusqu'au kilomètre 55 appartiennent à la formation Marno-gréseuse, RMA, et au-delà les composants de la série sédimentaire toscane, grès, siltites, argilites et marnes appartiennent à la formation de Castel Guerrino, TMG, aux marnes versicolores, TVM et au Macigno du Mugello TMM. Les trois derniers kilomètres passent dans les dépôts lacustres du Mugello. Il y a quatre fenêtres pour ce long tunnel, Rovigo au point 45,800 (555 mètres), Osteto au point 51,000 (1503 mètres), Marzano au point 54,450 (1503 mètres) et San Giorgio au point 57,750 (383 mètres).

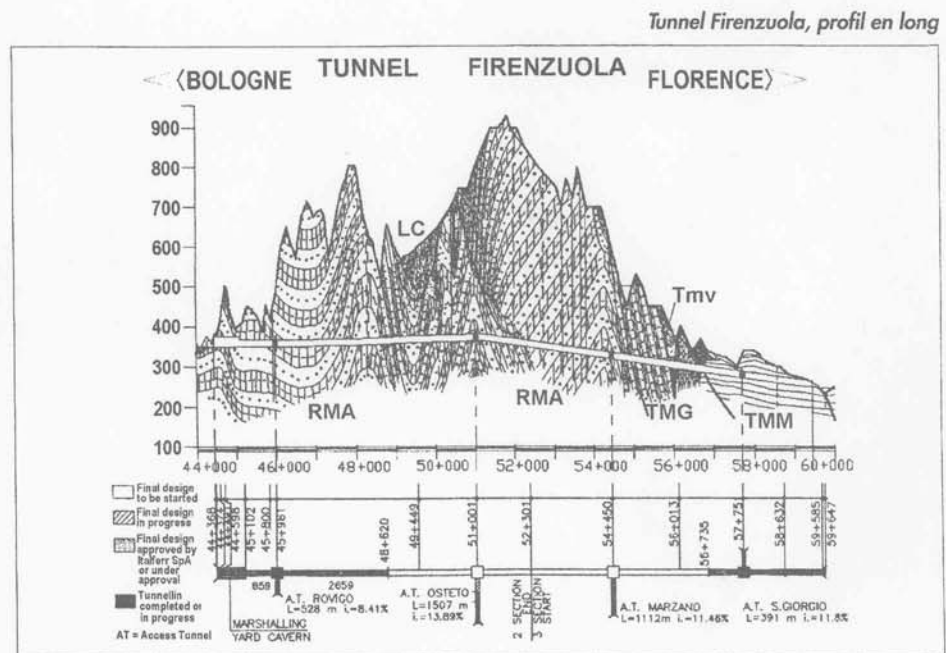
Le tronçon du tunnel Firenzuola entre la fenêtre San Giorgio et jusqu'au point 56,730 passe dans les dépôts lacustres du bassin du Mugello, consistant en silts sableux, avec des intercalations de sable pur. Au point 57,484, il a fallu traverser une intercalation sableuse épaisse d'une dizaine de mètres avec une pression d'eau de 3 bars. Comme le tunnel avançait à contre-pendage vers une lentille inclinée à 10° sur l'horizontale, il a rencontré le sable d'abord à la base du front, puis de plus en plus haut, et les venues d'eau ont augmenté avec la surface du sable, jusqu'à 6 litres par seconde. Les débits concentrés d'eau chargée ont érodé les piédroits, en causant des éboulements localisés.

Ces événements ont conduit à arrêter immédiatement l'excavation et à adopter une section type de la catégorie C. Après quelques forages sous divers angles pour reconstruire la géométrie de la lentille de sable les mesures suivantes ont été prises, en avant du front et immédiatement après lui :

- renforcement en avant du front avec des boulons en fibre de verre jumelés avec des tubes à manchettes dans le sable de la moitié inférieure du front ; le *jet grouting* a été



Tunnel Scheggianico, profil en long



Tunnel Firenzuola, profil en long

employé pour assurer la stabilité du tunnel pendant les opérations de forage et d'injection. en réglant convenablement les dosages, pressions et autres paramètres de l'injection. Quelques heures après l'introduction des tubes-boulons, le coulis sous pression a été injecté, valve après valve, en partant des plus proches du front vers les plus distants. De même on a injecté d'abord les boulons les plus près du centre du front. Ce système a permis d'écarter l'eau du noyau frontal.

Traitement de terrain autour du tunnel avec du *jet grouting* en colonnes sécantes ;

- drainage par des drains sub-horizontaux de 25 mètres, dont 15 mètres perforés et protégés de l'entraînement de sable par un tissu spécial, et 10 mètres étanchés et cimentés ;

- traitement des sables sur 5 mètres d'épaisseur au-dessous du radier avant son excavation. Afin de réduire la pression de l'eau et reprendre l'avancement avec sécurité, un drainage forcé a été installé avec des pointes filtrantes à la maille de 5 mètres, jusqu'à 6 mètres sous le niveau de l'excavation, raccordées à une pompe.

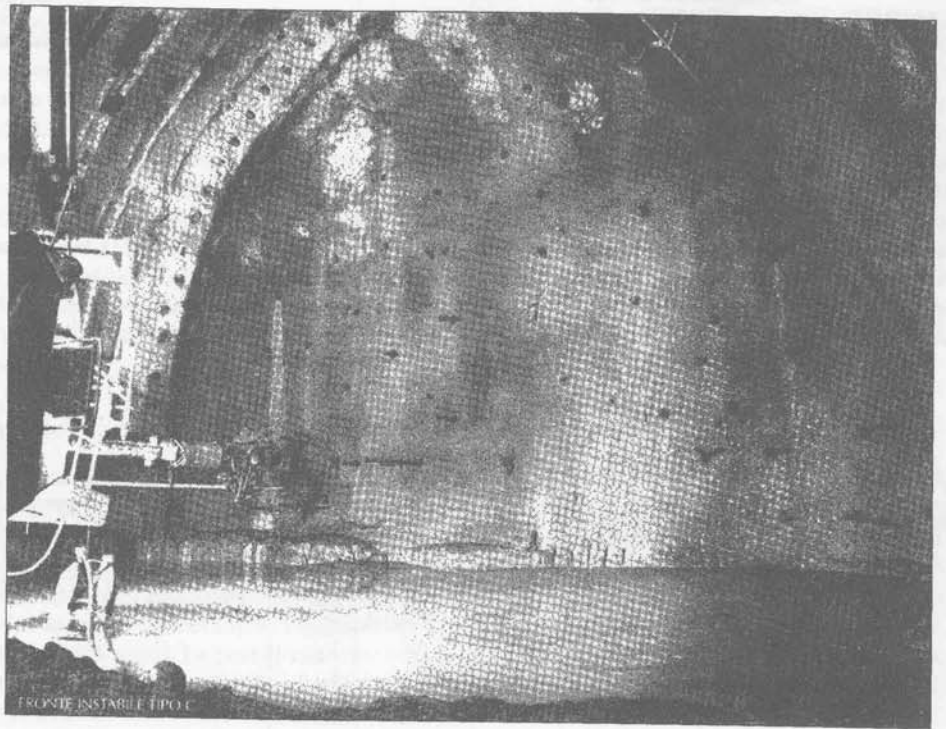
Devant l'efficacité de ce drainage forcé, les drains horizontaux ont été eux aussi raccordés à des pompes centrifuges.

La méthode de traitement du terrain en avant du front a été appliquée sur l'ensemble de la section d'une longueur de 60 mètres. Les résultats ont été excellents, car on a réussi à drainer l'eau sans entraînement de sable et à abaisser le niveau de la nappe, ce qui a permis d'excaver un terrain consolidé et pratiquement sec.

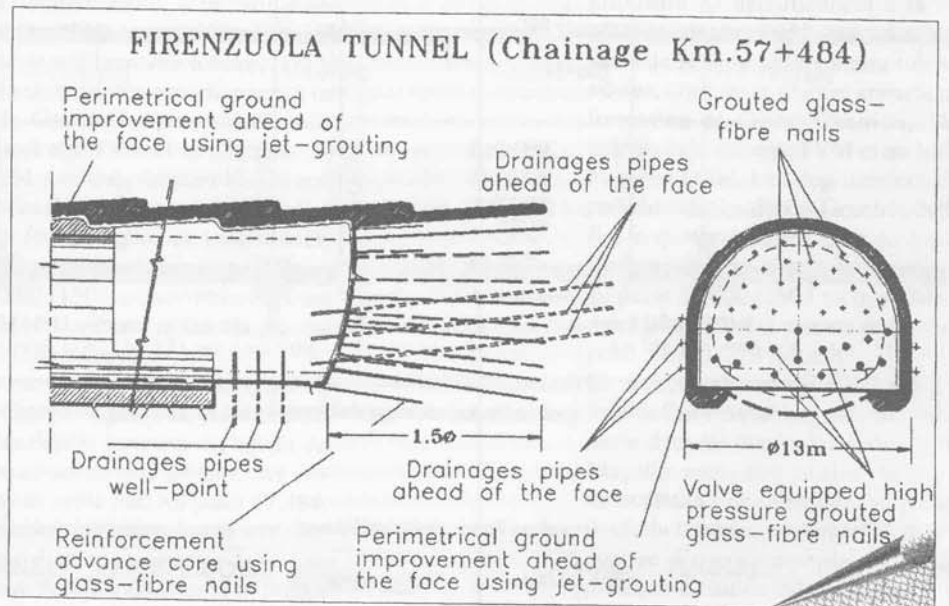
Tunnel Vaglia

Au point 59,647 commence un long tronçon en grande partie en surface pour traverser le Mugello jusqu'au point 64,650, excepté les deux modestes tunnels Borgo Rinzelli et Morticine (longueurs 717 et 654 mètres respectivement). Avec ses 18 kilomètres, le tunnel de Vaglia sera le plus long et le plus profond du tracé. Il sera pour l'instant arrêté au point 71,500 en attendant que soit fixé le raccordement avec le nœud ferroviaire de Florence ; il comportera une galerie de service d'environ 10 km, parallèle au tunnel sur 6 kilomètres, avec des rameaux de liaison tous les 250 mètres. La fenêtre Carlone, en deux branches de 261 et 141 mètres, le rejoint au point 69,300.

Le tunnel de Vaglia traverse du nord au sud les dépôts lacustres, puis le Macigno du Mugello TMM, pendant 2,5 kilomètres. Ensuite 900 mètres à travers la formation Siliano Ssi, analogue au Complexe chaotique, puis à partir du point 69,000 presque jusqu'à Castello la formation Monte Morello, ScM, constituée d'alternances de calcaires marneux et de marnes.

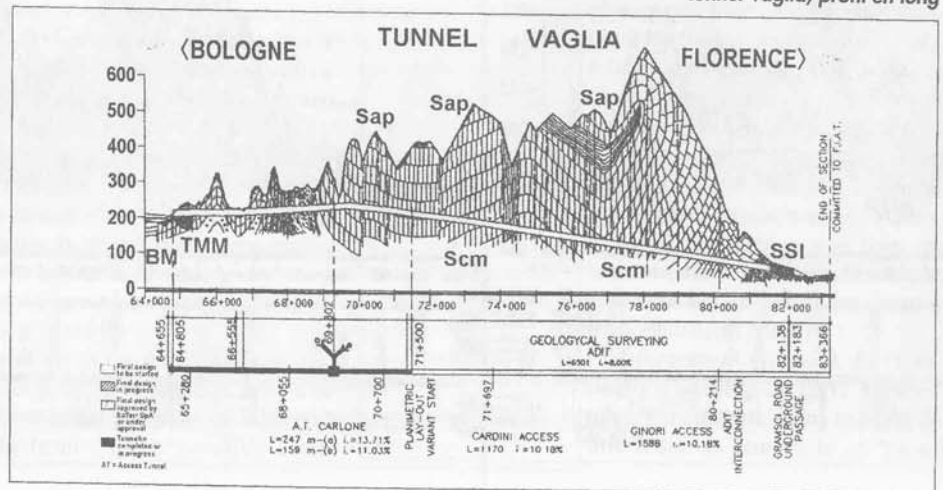


Tunnel Firenzuola



Tunnel Firenzuola

Tunnel Vaglia, profil en long



Un projet de niveau international

Par sa complexité et par l'importance des ressources et des capitaux mobilisées la nouvelle traversée des Apennins par le train italien à grande vitesse est un projet de niveau international. L'article décrit brièvement les principales données sur les ouvrages souterrains et donne des détails sur trois zones typiques des Apennins, l'une affectée par la présence de gaz, une autre par un glissement de terrain et la troisième au-dessous du niveau de l'eau souterraine, trois difficultés qui font de ce projet le plus problématique rencontré à ce jour. ■

P. Lunardi¹ et A. Focaracci²

Les auteurs remercient N. Meistro, G. Romano et M. Capasso, de Rocksoil, pour leur aide dans la préparation de cet article

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lunardi P., 1997 ; La liaison à grande vitesse Bologne-Florence ; *Mines & Carrières*, octobre, vol. 79 p. 59-64.
- [2] Lunardi P., 1997 ; Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et les sols ; pré-soutènement et pré-confinement ; *Rev. Française de Géotechnique*, n° 80.
- [3] Lunardi P., 1998 ; Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et les

sols ; rôle et résultats de la recherche expérimentale ; *Rev. Française de Géotechnique*, n° 84.

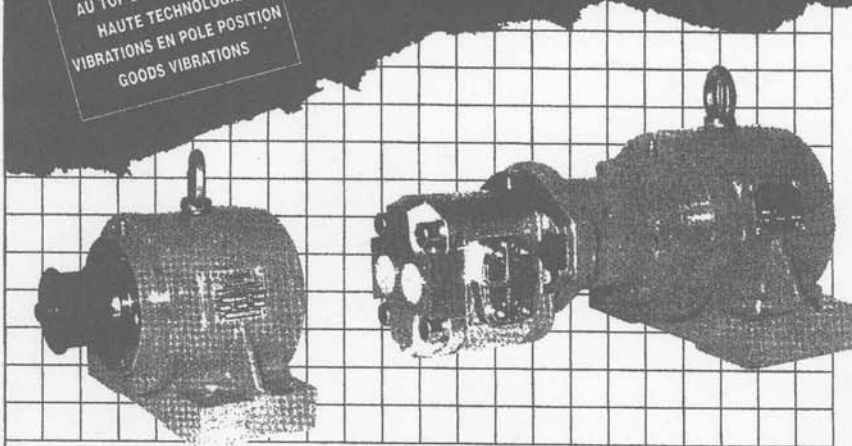
- [4] Lunardi P., 1999 ; Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et les sols ; proposition d'une nouvelle approche ; *Rev. Française de Géotechnique*, n° 86.
- [5] Lunardi P. et Focaracci A., 1998 ; Quality assurance in the design and construction of underground works ; C.R. Cong. Int. « Underground construction in modern infrastructure », Stockholm.

1. Bureau d'études géotechniques Lunardi, Milan.
2. Rocksoil S. p. A., Milan.

BATIMAT 1999 DU 8 AU 13.11.99 PARIS - PORTE DE VERSAILLES - HALL 4 - ALLEE F - STAND 37.

Haute technologie !

AU TOP DE LA TECHNIQUE
HAUTE TECHNOLOGIE
VIBRATIONS EN POLE POSITION
GOODS VIBRATIONS



Plus de 350 types de vibrateurs *

ÉLECTRIQUES - PNEUMATIQUES
MÉCANIQUES - HYDRAULIQUES
ÉLECTROMAGNÉTIQUES
ANTIDÉFLAGRANTS

* en toute tension selon les normes européennes



CASADIO SA : 16, route de Montpellier - RN 113 - BP 8 - 34431 ST-JEAN-DE-VÉDAS
Cedex France - Tél. : 04 67 27 54 00 - Fax : 04 67 47 48 30

CASADIO SARL : Zone Industrielle Mi-Plaine - 51, rue Ampère - BP 31
69682 CHASSIEU Cedex France - Tél. : 04 78 90 87 87 - Fax : 04 78 90 87 88



Marque déposée

VIBRATEURS INDUSTRIELS