

n° 744

## TUNNELS ROUTIERS

- Le tunnel de Foix.  
Un tunnel routier dans les calcaires et les marnes du Trias
- La partie française du tunnel du Somport
- Un tunnel routier sur la RD 148.  
Le tunnel de Boulc-en-Diois
  - Le tunnel de Pech Brunet

## TUNNELS FERROVIAIRES

- Un tunnel à proximité de la chartreuse de Bonpas
- Le métro de Lisbonne.  
Construction du tronçon Vale de Chelas/Oriente.  
Une nouvelle ligne pour desservir l'Exposition mondiale
- Eole. Les bétons architecturaux de la gare Magenta

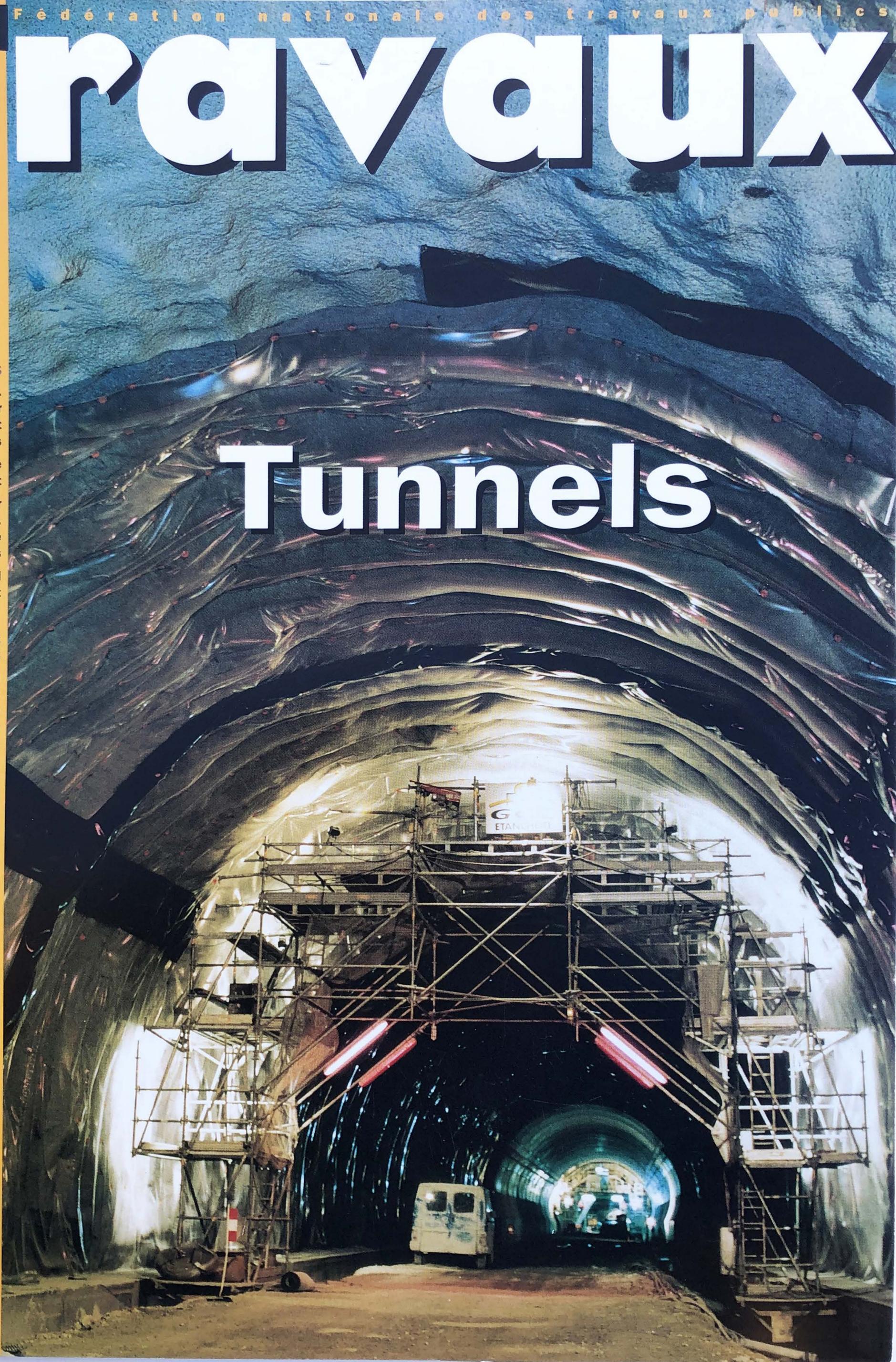
## RÉPARATION D'OUVRAGES

- Le tunnel sous la Manche réparé en soixante jours
- La rénovation du tunnel sous Fourvière. Les travaux de génie civil et du gros œuvre

## PILOTAGE DE TUNNELIER

- Innovation dans le pilotage des tunneliers. Utilisation d'un gyrocompas sur le chantier de Clichy-la-Briche lot 4

# Tunnels



# Travaux numéro 744

# juillet-août 1998

# Tunnels



## Notre couverture

### Tunnel de Foix. Mise en place d'un contexte d'étanchéité

Photo : Alex Béraud

## DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

## RÉDACTION

Roland Girardot et Henry Thonier  
3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. : (33) 01 44 13 31 44

## SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart  
Tél. : (33) 02 41 35 09 95

## MAQUETTE

T2B&H  
8/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris  
Tél. : (33) 01 44 64 84 20

## VENTES ET ABONNEMENTS

RGRA  
9, rue Magellan - 75008 Paris  
Tél. : (33) 01 40 73 80 05  
  
France : 900 FF TTC  
Etranger : 1100 FF  
Prix du numéro : 115 FF (+ frais de port)

## PUBLICITÉ

Régie Publicité Industrielle  
61, bd de Picpus - 75012 Paris  
Tél. : (33) 01 44 74 86 36

Imprimerie Chirat  
Saint-Just la Pendue (Loire)

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (Copyright by Travaux). Ouvrage protégé : photocopie interdite, même partielle (loi du 11 Mars 1957), qui constituerait contrefaçon (Code pénal, article 425).

## Éditions Science et Industrie S.A.

3, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n° 57304



## éditorial

Daniel Tardy

## actualités

## matériels

## Les signatures des entreprises françaises à travers le monde

## PRÉFACE

◆ Des tunnels aujourd'hui... mais demain ?  
- *Tunnel's today... but tomorrow ?*

Philippe Sardin

## TUNNELS ROUTIERS

◆ Le tunnel de Foix. Un tunnel routier dans les calcaires et les marnes du Trias  
- *The Foix tunnel. A highway tunnel in the limestone and marl formations of the Triassic*

P. Ichard

◆ La partie française du tunnel du Somport  
- *The French part of the Somport tunnel*

G. Cueille

◆ Un tunnel routier sur la RD 148. Le tunnel de Boulc-en-Diois  
- *A tunnel on highway RD 148. The tunnel of Boulc-en-Diois*

E. Fegy

◆ Le tunnel de Pech Brunet  
- *The Pech Brunet tunnel*

B. Mahieu, A. Antoine

## TUNNELS FERROVIAIRES

◆ Un tunnel à proximité de la chartreuse de Bonpas  
- *A tunnel near the Bonpas Monastery*

O. Betoux

◆ Le métro de Lisbonne. Construction du tronçon Vale de Chelas/Oriente. Une nouvelle ligne pour desservir l'Exposition mondiale  
- *The Lisbon metro. Construction of the Vale de Chelas/Oriente section. A new line serving the World's Fair*

A. Lacroix

# Sommaire

juillet-août 1998

## Tunnels

**Dans les prochains numéros**

- Autoroute de la Maurienne**
- Eau**
- Terrassements**
- International**
- Ponts**
- Routes**
- Travaux urbains**
- Sols et fondations**
- Tunnels**



◆ Eole. Les bétons architecturaux de la gare Magenta  
- *Eole. The architectural concrete of the Magenta train station*

*Fr. Bertrand, R. Legrand*



### RÉPARATION D'OUVRAGES

◆ Le tunnel sous la Manche réparé en soixante jours  
- *The Channel Tunnel repaired in 60 days*

*Ph. de Pins, Ph. Zanker, J.-M. Demorieux*



◆ La rénovation du tunnel sous Fourvière. Les travaux de génie civil et du gros œuvre  
- *Renovation of the Fourvière tunnel. Civil engineering and structural masonry*

*R. Chalard, J. Mouchon, J.-M. Guetemme*

### PILOTAGE DE TUNNELIER

Innovation dans le pilotage des tunneliers. Utilisation d'un gyrocompas sur le chantier de Clichy-la-Briche lot 4  
- *Innovation in the control of tunnel boring machines. Use of a gyrocompass on the Clichy-la-Briche site, section 4*

*P. Bony, R. Freant, O. Gauche*

**économie**

**social**

**répertoire des fournisseurs**

54

61

65

69

73

76

78

# Des tunnels aujourd'hui... mais demain ?

**C**e numéro de *Travaux* est consacré entièrement aux tunnels. Les expériences relatées dans les dix articles démontrent que les entreprises françaises sont présentes dans la réalisation de tunnels aussi bien sur le réseau ferré que sur le réseau routier (national, départemental ou concédé), à la fois dans les zones de relief comme les Pyrénées ou les Alpes et dans les zones urbaines, en France, à ses frontières ou à l'étranger (Lisbonne).

Le rythme de construction des tunnels a été assez soutenu ces dernières années, comme en témoigne la parution annuelle d'un numéro spécial. Curieusement à part l'article consacré à l'innovation dans le pilotage des tunneliers, il n'y a pas de présentation des travaux d'assainissement qui continuent à garnir les carnets de commandes des entreprises. Tout montre en effet que nous vivons en France la fin de grands travaux souterrains (Eole, Météor, TGV Méditerranée, tunnels sur le réseau routier et concédé) alors que nos voisins européens bénéficient de programmes routiers et ferroviaires impressionnants.

Certes il y a des perspectives, mais très lointaines, comme les liaisons Lyon-Turin et Nice-Cuneo. A plus court terme, le tunnel A 86 Ouest et le tunnel du Mont-Sion dont la réalisation paraissait imminente sont reportés pour des raisons qu'il n'est pas nécessaire de rappeler.

Pourquoi cette désaffection ?

Bien sûr les tunnels sont des ouvrages chers, mais ils apparaissent plus chers encore aux maîtres d'ouvrage quand les coûts dérivent entre les montants annoncés au niveau des études ou de la passation des marchés

et le règlement final. D'une part, les crédits nécessaires pour réévaluer les opérations ne sont plus disponibles pour des opérations nouvelles, d'autre part, les maîtres d'ouvrage hésitent à lancer des opérations dont la précision des coûts leur paraît parfois si incertaine.

Le redressement n'est possible que par les efforts de tous les partenaires, afin de briser le cercle infernal de la sous-estimation au niveau des études et au niveau des soumissions, conduisant de façon inexorable aux réclamations et aux réévaluations.

Les programmes de recherche et les retours d'expérience des chantiers conduisent à une meilleure connaissance

des phénomènes et à des dimensionnements mieux adaptés. Encore faut-il que les maîtres d'ouvrage comprennent que les études sont indispensables pour réduire les incertitudes.

Quant aux procédures d'attribution des marchés, elles sont décriées depuis aussi longtemps que les marchés publics existent. Seules des initiatives courageuses des maîtres d'ouvrage et des entreprises permettront d'échapper à leurs effets pervers.

Des débats très intéressants ont eu lieu à ce sujet au cours des journées d'études organisées sur les tunnels en mars 1998 par le SNBATI. L'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) qui réunit entreprises, bureaux

d'études et maîtres d'ouvrage a mis en place récemment un groupe de travail chargé de présenter des recommandations concernant la dévolution des marchés publics de travaux souterrains.

Souhaitons que les résultats de ces réflexions et une meilleure conjoncture se conjuguent pour faire retrouver le sourire à toute la profession.



■ **PHILIPPE SARDIN**

**ICPC**

**Directeur du CETU**

# Le tunnel de Foix

## Un tunnel routier dans les et les marnes du Trias

Le tunnel de Foix est la principale étape du contournement de Foix par la RN 20. Cet ouvrage à 2 voies, long de 2,1 km, qui comporte une usine de ventilation à chaque extrémité, a été percé à deux attaques par les méthodes classiques de creusement à l'explosif puis revêtu sous une membrane d'étanchéité.

Il s'inscrit dans les calcaires et dolomies pour sa majeure partie, un tronçon central de 180 m, traversant les marnes du Trias. La rencontre d'anhydrite gonflante a nécessité l'exécution d'une contre-voûte fortement ferrillée.

Photos Alex Béraud



**Photo 3**  
Mise en place  
des cintres de soutènement  
en zones de mauvaise tenue

*Setup of support arches  
in unstable zones*

**Photo 2**  
Le robofore  
en action  
*The Robofore drill  
in action*

### LE PROJET

Pour résoudre le problème des embouteillages chroniques qui affectent la traversée de Foix par la RN 20, le ministère de l'Équipement a décidé de réaliser une déviation et d'en confier la maîtrise d'œuvre à la DDE de l'Ariège. Elle permettra à terme (fin 2000) de relier les deux tronçons de 2 x 2 voies existant au nord et au sud de la ville et d'assurer, grâce à l'autoroute A 66 une liaison rapide entre Toulouse, la haute vallée de l'Ariège et Andorre.

Cette opération étalée sur 5 ans (1996-2000) comprend trois ouvrages principaux :

- ◆ un tunnel de 2080 ml ;
- ◆ un viaduc de 550 ml ;
- ◆ et une tranchée de 800 000 m<sup>3</sup> réalisée à l'abri de soutènement par parois clouées.

### LE TUNNEL

Il s'agit d'un ouvrage classique à deux voies. Une dalle intermédiaire permet de créer en partie haute trois galeries de ventilation. Il mesure 2 130 ml

**Photo 1**  
Vue générale de la plate-forme  
montrant l'amorce du deuxième tube

*General view of platform  
showing the start of the second tube*



de long dont 2080 ml forés. La section déroctée est de 100 m<sup>2</sup> en section courante, le revêtement en béton B25 représente 15 m<sup>3</sup> au ml. La pente longitudinale est de 1,6 % mai. La dalle de ventilation dégage un gabarit de 5,50 m. La largeur roulable est de 9 m divisée en 2 voies de 3,50 m, une bande centrale de 1 m et deux bandes dérasées de 0,50 m (figure 1). La vitesse de référence admise est de 80 km/h.

L'équipement de sécurité comprend :

- ◆ deux trottoirs de 0,70 m ;
- ◆ 20 niches de sécurité ;
- ◆ 4 refuges piétons, deux galeries de retournement poids lourds de même section que le tunnel ;
- ◆ et des amorces de communication vers un deuxième tube situé à l'est dont seule l'amorce a été creusée sur 50 m côté sud (photo 1).

Les eaux de drainage et les eaux de ruissellement sur chaussée sont séparées. Elles sont évacuées par deux collecteurs distincts.

La ventilation est assurée par deux usines disposées en extrémité, en souterrain au sud et en extérieur côté nord. Le rejet du désenfumage est prévu par un puits à flanc de coteau au sud et dans une cheminée à travers l'usine côté nord.

L'air frais, puisé aux têtes du tunnel, est véhiculé dans deux compartiments latéraux délimités par la dalle, la voûte et deux cloisons situées de part et d'autre de l'axe du tunnel.

Il est ensuite distribué tous les 12 m dans la zone de circulation, à travers la dalle en partie haute côté Est et à travers un carneau noyé dans le piédroit côté ouest.

### GÉOLOGIE

On distingue du sud au nord :

- ◆ des calcaires et dolomies noires sur 550 m environ, zone faiblement aquifère ;
- ◆ une zone de Trias sur 200 m environ ;
- ◆ des calcaires, dolomies, et brèches sur 1 350 m environ, cette zone étant plus aquifère que celle du sud (figure 2).

### LE CREUSEMENT

#### Accès aux têtes

Un terrassement combinant l'utilisation de l'explosif et du BRH a permis de dégager les entrées du tunnel côté sud. Le parement est laissé brut de dé-



# calcaires

roctage. La même méthode a été appliquée côté nord où un confortement et un drainage de la zone de tête ont été rendus nécessaires par la qualité assez moyenne des marnes noires rencontrées.

## L'attaque sud

Le percement a débuté le 25 juin 1996. L'atelier était composé d'un robofore Montabert (photo 2), d'une pelle électrique Broyt-X 42 EL, de 3 dumpers D30 Cat, d'une pelle Cat 325 équipée pour la purge (BRH ou fraise) et la pose des cintres, d'une nacelle Normet Himec, d'un jumbo Montabert Pantofore pour boulonnage et d'un robot de projection Coime.

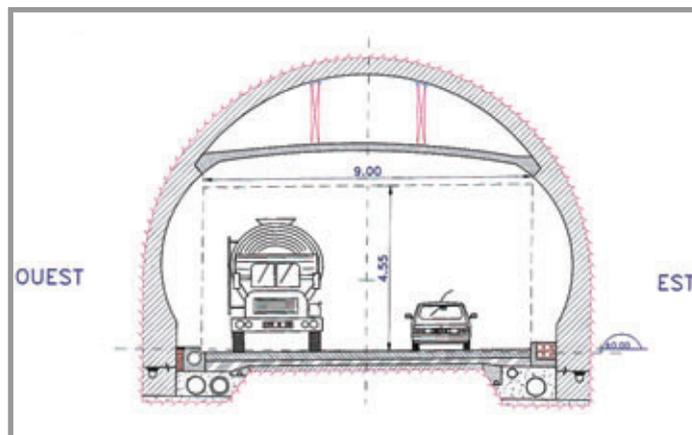
Le chantier s'est trouvé rapidement confronté à des dolomies et des calcaires très fracturés nécessitant de travailler par 1/2 sections et de recourir à un soutènement par cintres lourds avec soutènement systématique du front de taille par béton projeté fibré (associé parfois à quelques boulons Swellex).

Le déroctage s'est poursuivi à l'explosif par volées raccourcies. Les marnes du Trias (trop raides pour être excavées au BRH) ont nécessité l'emploi de l'explosif avec une bonne tenue du boulonnage, quelques phénomènes d'écaillage du front de taille s'étant cependant manifestés. A la fin de la zone marneuse au PM 718, l'attaque sud a rencontré des calcaires broyés et aquifères nécessitant la pose systématique de cintres jusqu'au PM 870. Les conditions s'améliorant, la pleine section a été reprise sur les 30 derniers mètres de l'attaque avant la percée au PM 902.

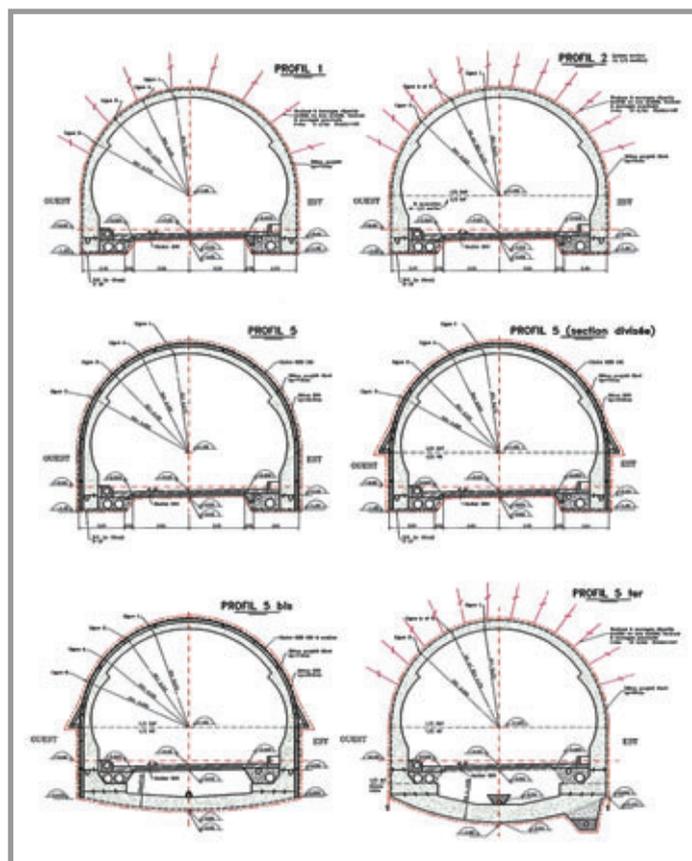
Le soutènement associait un boulonnage à action répartie et immédiate (boulons Swellex midi et super Swellex de 4 et 5 m) mis en œuvre entre deux couches de béton projeté fibré d'une épaisseur totale variant de 7,5 à 15 cm (figure 3). Dans la zone de mauvaise tenue, le soutènement était constitué de cintres lourds HEB 180 et d'un béton de garnissage B20 mis en place derrière un blindage en tôles (photo 3).

Dans les zones critiques où la stabilité du front posait problème, l'entreprise a eu recours à un pré-soutènement par boulons en fibre de verre Sireg, scellés au coulis, de 15 ml de long (24 u pour la demi-section supérieure de 70 m<sup>2</sup>) associé à un béton projeté de 20 cm minimum d'épaisseur et à un enfilage en toit sur 120 degrés de barres HA 32 de 3 à 6 m de long.

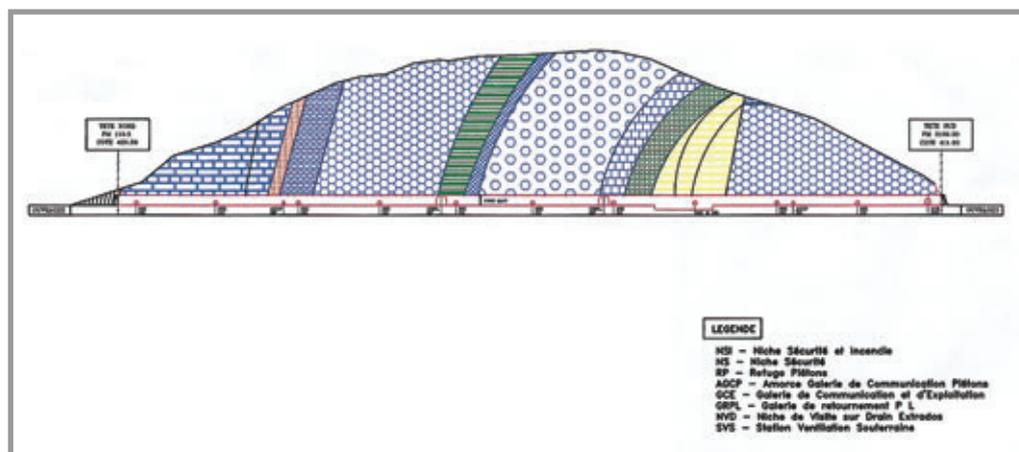
La longueur des volées était réduite à 2 m et certaines travées ont été excavées au BRH, l'espa-



**Figure 1**  
**Coupe transversale**  
**Cross section**



**Figure 3**  
**Profils excavés**  
**Excavated sections**



**Figure 2**  
**Coupe longitudinale**  
**Longitudinal section**

**LEGENDE**  
 NS - Niche Sécurité et incendie  
 NS - Niche Sécurité  
 RP - Refuge Piletons  
 ACP - Amorce Galerie de Communication Piletons  
 GCE - Galerie de Communication et d'Exploitation  
 GRL - Galerie de retournement P.L.  
 NVD - Niche de Visée sur Drain Extrados  
 SVS - Station Ventilation Souterraine

**Photo 4**  
Opérations  
de marouflage.  
Dumper D30  
en manœuvre  
de demi-tour

*Mucking  
operations.  
Dumper D30  
in a half-turn  
manœuvre*

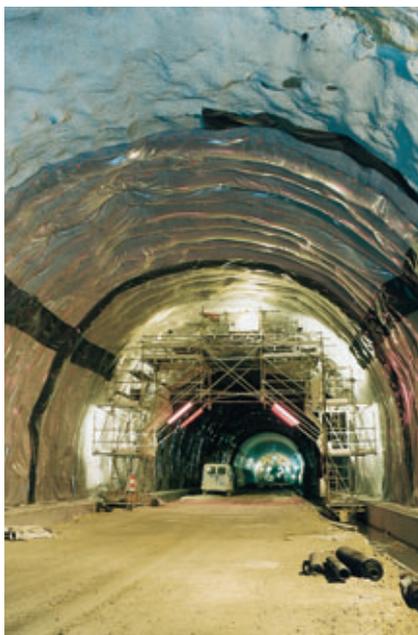


**Photo 6**  
Vue  
du revêtement  
View of lining



**Photo 5**  
Mise en place  
d'un contexte  
d'étanchéité

*Setup  
of waterproofing*



► cement des cintres variant de 0,80 m à 1,50 m. L'avancement s'effectuait par 1/2 section sur des tronçons de 35 m, la 1/2 section inférieure suivant la voûte à une distance variant de 54 m au plus loin, à 19 m au plus près.

L'équipement mis en jeu permettait de travailler en 1/2 section supérieure, les dumpers D30 Cat (photo 4) pouvant faire 1/2 tour en partie haute et être chargés par une chargeuse Cat 950. L'avancement moyen en 1/2 section a varié de 5 à 32 m par semaine. La consommation moyenne d'explosif ressort pour cette attaque à environ 900 g/m<sup>3</sup> abattu.

### L'attaque nord

L'attaque nord a débuté fin novembre 1996 avec un équipement pleine section composé d'un Robofore, de la pelle Broyt venant de l'attaque sud, d'une pelle Fiat Hitachi FH 400 équipée d'une fraise Mitsui et d'un BRH et de 4 dumpers D30 ou D300 Cat.

Globalement, le terrain s'est avéré à peu près conforme aux prévisions mises à part des coupes argileuses qui ont perturbé la foration et le chargement des volées et ont nécessité la projection systématique de béton sur le front.

L'avancement moyen sur 1130 fut de 34 m par semaine avec un record à 52 m sur 15 postes de travail. La consommation moyenne d'explosif ressort à 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

### Les ouvrages annexes

On désigne ainsi, les galeries de retournement poids lourds (GRPL) l'usine de ventilation sud, le puits d'extraction des fumées sud, l'amorce du tube Est et sa liaison avec le tube ouest. Les deux GRPL ont été excavées à pleine section grâce, au sud notamment à la présence d'un terrain de bonne tenue permettant de soutenir le carrefour (intersection de deux ouvrages de 12,50 m d'ouverture au terrassement) avec des boulons et du béton projeté. Le tube Est (50 m) situé dans une zone faillée a été excavé en 1/2 section et soutenu par cintres sur la moitié de son linéaire.

L'usine de ventilation et sa prise d'air ont été excavées en grande partie à l'intérieur d'une cavité karstique très importante. Un contre-coffrage en cintres lourds et tôles de blindage, outre son rôle de soutènement a permis de "reconstituer" l'extrados, de poser l'étanchéité et de limiter l'épaisseur du béton de revêtement.

Le puits de rejet des fumées a été excavé en remontant en trois volées sur une hauteur de 10 m au moyen d'un Pantofore à deux bras.

### ■ L'ÉTANCHÉITÉ (photo 5)

Un complexe d'étanchéité est mis en place sur tout le linéaire du tunnel. Il est composé d'un drainage en Delta MS, d'un géotextile 600 gr et d'une feuille de PVC 15/10°. La feuille PVC est soudée sur un profilé colaminé spité sur la partie supérieure des banquettes entre le caniveau et l'intrados. Deux portiques motorisés pour la translation sont utilisés. Le déroulage et la pose des lés s'effectuent manuellement.

### ■ LES REVÊTEMENTS (photo 6)

#### Les bétons

Les bétons de revêtement sont de trois types :

- ◆ B25 pour les voûtes ;
- ◆ B30 pour les ouvrages de tête et regards ;
- ◆ B35 pour les dalles.

Ils sont produits par une centrale installée sur le site, tête nord. Le ciment employé est du CPJ 52,5 CP2. En période hivernale, ils sont chauffés à 26° et adjuvantés au glénium 27 ce qui leur confère, outre le maintien de l'ouvrabilité, de bonnes performances au jeune âge et autorise un décoffrage des voûtes 11 h après la fin du coulage. La maturation du béton est suivie au maturimètre Sensegreen.

#### Les voûtes

Préalablement au bétonnage des anneaux de revêtement, deux banquettes ont été coulées à la

base des piédroits. Elles comportent un caniveau incorporé revêtu d'une dalle en BA et destiné à recueillir les eaux ruisselant sur la feuille d'étanchéité. Ensuite la structure est bétonnée par anneaux de 12 m au moyen d'un coffrage autobloquant (photo 7). Le cycle, pour un anneau dure 24 heures :

- ◆ 6 à 7 heures de bétonnage pour 170 à 210 m<sup>3</sup> ;
- ◆ 11 heures de séchage ;
- ◆ 6 heures pour le décoffrage/recoffrage.

Le chantier est organisé à 3 postes, le béton étant coulé tous les matins à 6 heures.

Les voûtes ne sont pas armées, à l'exception du corbeau d'appui des dalles.

Les carnaux de ventilation sont intégrés au revêtement. Trois coffrages gonflables Ø 160 Satujo sont mis en place à l'arrière du plot pour créer trois réservations cylindriques de 4,80 m de long dans l'épaisseur du piédroit. Ces réservations débouchent à la base de l'ouvrage et à travers le corbeau d'appui de la dalle.

### Les dalles (photo 8)

A 100 m derrière la voûte, l'atelier de bétonnage des dalles avance au rythme de deux coulages de 24 m par semaine. Ces dalles sont appuyées sur le corbeau et de par leur forme légèrement voûtée, elles trouvent également un appui sur la partie de la voûte surmontant le corbeau. Ces appuis se font par l'intermédiaire d'un joint néoprène.

Le ferrailage est constitué de panneaux de treillis soudé de fabrication spéciale (2 nappes et 7 distanciers). La réservation pour les carnaux, se fait au travers de la zone d'appui de l'épaisseur de la dalle au moyen de coffrages Satujo de 1,50 m de long. Le décoffrage a lieu 18 à 20 heures après la fin du coulage.

### Les cloisons de ventilation

Tout en assurant un rôle coupe-feu, ces cloisons doivent résister à une pression d'air de 550 kg/m<sup>2</sup> et peuvent se déplacer verticalement pour accompagner les mouvements de la dalle (maximum 7 cm), sans être bloquées sous la voûte.

La solution mise en œuvre consiste à réaliser ces cloisons avec des blocs de béton cellulaire Ytong, convenablement raidis par des poteaux verticaux tous les 1,20 m, maintenus en tête par deux cornières en béton composite Aco spitées sur la voûte. Un joint coupe-feu assure l'étanchéité à l'air.

### LES RÉSEAUX ET CORPS DE CHAUSSÉE

A la base des piédroits sous la partie dérasée et sous les trottoirs se trouvent les réseaux d'évacuation et d'incendie. On distingue :

- ◆ 1 Ø 500 BA de chaque côté pour récupérer les



**Photo 7**  
Coffrage de la voûte  
*Shuttering for the crown*



**Photo 8**  
Dalle de ventilation  
*Ventilation slab*

eaux d'exhaure (drainage de chaussée longitudinal et ruissellement sur le PVC d'étanchéité) ;

- ◆ 1 Ø 400 BA côté ouest collecte les eaux de déversement accidentel sur chaussée. Ces eaux sont captées par un caniveau à fente côté ouest ;
  - ◆ 1 Ø 200 fonte conduite incendie côté est ;
  - ◆ des multitubulaires intégrées au trottoir ouest.
- Le caniveau à fente et le corps de chaussée (30 cm B20) seront réalisés en coffrage glissant.

### LE PROBLÈME DE L'ANHYDRITE (photo 9)

L'exécution du revêtement a été sérieusement perturbée, côté sud par l'apparition d'un phénomène imprévu. Début juin 1997, on a remarqué que les radiers de roulement (qui devaient être intégrés au corps de chaussée) se fissuraient et se soulevaient entre les PM 570 et 718. Après analyse par les géologues du chantier, il s'est avéré que le terrain sous-jacent recelait de l'anhydrite, matériau très sensible à l'eau et très expansif. Ces gonflements ont atteint jusqu'à 1 m !

Afin que le revêtement résiste aux pressions de gonflement, il a été décidé de reprofiler le tunnel en créant un radier incurvé, de réaliser une contrevoûte en B35 fortement armé (200 kg/m<sup>3</sup>) sur 144 m de long et d'armer légèrement la voûte.

Des travaux de captage par deux tranchées drai-



**Photo 9**  
Bétonnage du radier incurvé dans la zone anhydrite  
*Concreting the invert in the anhydrite zone*



nantes ont été réalisés en amont de la zone. Une étanchéité a été appliquée en extrados de radier. Elle comprend :

- ◆ le béton de propreté coulé sur polyane ;
- ◆ un géotextile 1000 gr ;
- ◆ un PVC 20/10° ;
- ◆ une protection PVC 17/10°.

Les aciers sont posés sur des cales à béton "barrettes" pour limiter le poinçonnement du complexe étanche. Les plots de radier sont coulés par 12 ml. Afin de pouvoir contrer rapidement les mouvements de soulèvement il a été décidé de couler la voûte au plus près des contre-voûtes.

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### **Maître d'ouvrage**

Ministère de l'Équipement, du logement et des transports

### **Maître d'œuvre**

DDE de l'Ariège

### **Entreprises principales**

Groupement Borie SAE - SAES - SAEMP - Forézienne d'Entreprises

### SOUS-TRAITANTS PRINCIPAUX

**Étanchéité :** EIGCC

**Chaussées et canalisations :** Malet

**Terrassements extérieurs :** SAT TP

**Géologie/Mesures :** Simecsol

**Parois clouées :** SATS

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS

**Longueur :** 2100 m section 100 m<sup>2</sup>

**Béton projeté :** 12000 m<sup>3</sup>

**Boulons Swellex :** 10000 u

**Volume excavé :** 200000 m<sup>3</sup>

**Cintres :** 380 t

**Béton de revêtement :** 40000 m<sup>3</sup>

**Béton de dalles :** 8500 m<sup>3</sup>

**Début des travaux :** mars 1996

**Fin prévue :** novembre 1998

## ENGLISH SUMMARY

### A highway tunnel in the limestone and marl formations of the Triassic The Foix tunnel

*P. Ichard*

The Foix tunnel is the main stage in the bypassing of Foix via highway RN 20. This two-lane structure, 2,1 km long, with a ventilation plant at each end, was excavated with two working faces using conventional blasting methods and then lined with a waterproofing membrane. It is located for the most part in limestone and dolomite formations, with a central section of 180 m going through the marl of the Triassic. The swelling anhydrite encountered made it necessary to provide a highly reinforced counter-arch.

## DEUTSCHES KURZREFERAT

### Ein Straßentunnel durch Kalkstein und Mergel aus der Trias Der Foix-Tunnel

*P. Ichard*

Ein Tunnel ist die Hauptetappe der Umgehung von Foix über die Nationalstraße RN 20. Das zweispurige Bauwerk ist 2,1 km lang und umfaßt je eine Belüftungsstation an den Enden. Es wurde nach einer herkömmlichen Sprengmethode von beiden Seiten her gebohrt, dann wurde eine Dichtmembran eingezogen. Der größte Teil führt durch Kalkstein und Dolomit, der 180 m lange zentrale Abschnitt durchquert Mergel-formationen aus der Trias. Das Vorliegen von treibendem Anhydrit hat die Errichtung eines verkehrten Gewölbes mit ausgeprägter Bewehrung notwendig gemacht.

## RESUMEN ESPAÑOL

### Un túnel viario en las calizas y margas del Trias El túnel de Foix

*P. Ichard*

El túnel de Foix constituye la etapa principal de la variante de Foix por la carretera RN 20. Esta obra, de 2 canales de tráfico y una longitud de 2,1 km, que consta de una planta de ventilación por cada extremo, ha sido excavado en doble ataque, aplicando los

métodos convencionales de excavación con explosivos y acto seguido, aplicación de un revestimiento formado por una membrana de impermeabilización. En su mayor parte, el túnel atraviesa terrenos de calizas y dolomitas y en un tramo central de 180 m atraviesa las margas del Trias. Al tropezar con una anhidrita expansible, fue necesario ejecutar una contrabóveda sólidamente armada.



# La partie française du tunnel du Somport

**L'itinéraire Pau - Saragosse par la RN 134 et le col du Somport (altitude 1632 m) constitue un des quatre axes européens transpyrénéens.**

**Le percement d'un tunnel sous le col du Somport entre dans le cadre de la modernisation de cet axe : ce tunnel bidirectionnel permettra le franchissement de la barrière des Pyrénées à une altitude un peu inférieure à 1200 m, à l'abri des aléas hivernaux (figures 1 et 2).**

## LE PROJET

### Tracé en plan

D'une longueur de 8597 m (5722 m en Espagne et 2845 m en France) le tunnel routier a ses têtes situées côté France aux Forges d'Abel et côté Espagne près de la gare de Canfranc. Il longe le tracé d'un ancien tunnel ferroviaire non exploité à une distance de 100 à 400 m. Le tracé est en alignement droit en partie centrale, en courbes et contre-courbes aux extrémités (figure 3).

### Profil en long

Le profil en long est en forme de V inversé avec des pentes de 1,65 % à partir de la tête nord et de 0,5 % à partir de la tête sud. Le point haut se situe en Espagne, à 3436 m de la tête sud.

### Section type

La section type du tunnel est caractéristique d'un ouvrage routier, avec une largeur intérieure de 11,04 m, soit une ouverture à l'excavation de l'ordre de 12 m (section excavée de 100 m<sup>2</sup>). Elle permet la circulation sur deux voies de sens opposé présentant les caractéristiques suivantes :

- ◆ gabarit de 4,55 m ;
- ◆ largeur roulable de 9 m se décomposant en :
  - 2 voies de 3,50 m,
  - 1 bande médiane de 1 m permettant le maintien de la circulation dans les deux sens au droit d'un véhicule immobilisé sur la chaussée,
  - 2 bandes de guidage latérales de 0,50 m ;
- ◆ deux trottoirs de 0,75 m (figure 4).

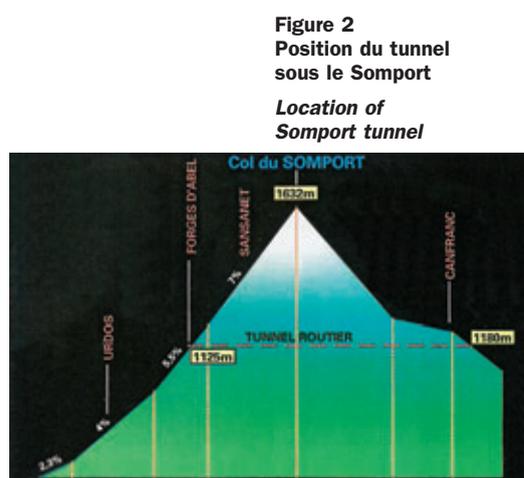
### Equipements d'exploitation et de sécurité

Ces équipements comprennent :

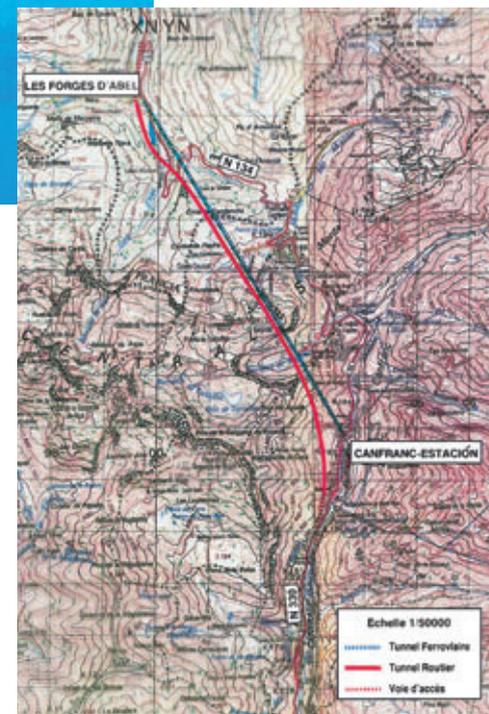
- ◆ un système de ventilation et d'évacuation des fumées semi-transversal assuré par soufflage d'air



**Figure 1**  
Les liaisons transpyrénéennes européennes  
*Europe's transpyrenean links*



**Figure 2**  
Position du tunnel sous le Somport  
*Location of Somport tunnel*

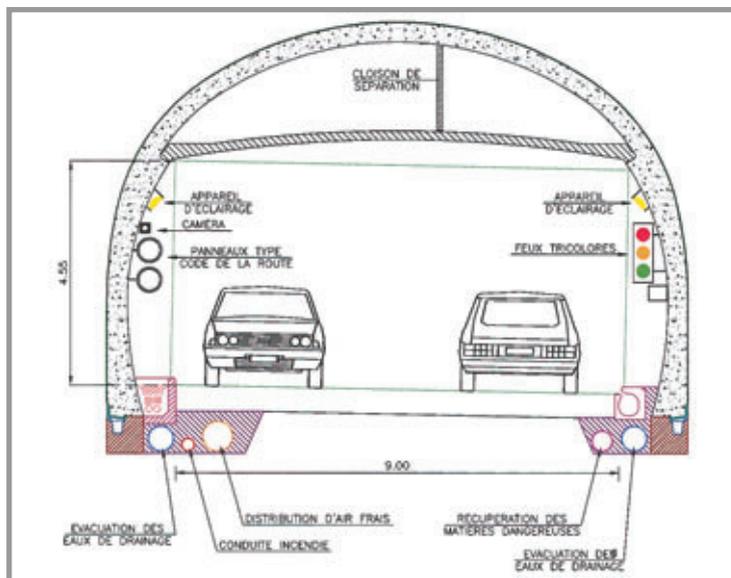


**Figure 3**  
Tracé en plan du tunnel  
*Alignment of the tunnel*

frais le long du tunnel à partir de gaines de ventilation alimentées par trois stations :

- deux en tête de tunnel,
- une intermédiaire en pied de galerie, reliée à la surface par deux puits inclinés (diamètre intérieur 4,90 m, dénivelé 230 m) ;
- ◆ un éclairage artificiel ;
- ◆ des niches de sécurité, un dispositif de surveillance...

**Figure 4**  
Section type  
du tunnel  
  
Typical  
cross section  
of the tunnel



- ◆ profil P3 : boulons, béton projeté 32 cm, cintres réticulés ;
- ◆ profil P4 : cintres HEB 180, blindage et béton de blocage ;
- ◆ profil P5 : idem P4 avec présoutènement par barres ;
- ◆ profil P6 : (réservé aux entrées) idem P4 avec voûtes parapluies.

## ■ ORGANISATION DES TRAVAUX (CÔTÉ FRANCE)

### Installations de chantier

Situées à proximité de la tête nord, elles comprennent :

- ◆ les bureaux de l'entreprise et du maître d'œuvre ;
- ◆ la base vie pour le personnel composée de quatre bâtiments ;
- ◆ la zone technique tête nord, avec ateliers, magasins, containers de préconditionnement des charges, bureaux de l'encadrement production ;
- ◆ la zone de la centrale à béton et des installations du matériel de marinage ;
- ◆ la zone de mise en remblais des déblais du tunnel ;
- ◆ les bassins de décantation.

### Organisation des cycles d'avancement

Il y a lieu de distinguer les travaux d'excavation au front, de ceux réalisés plus à l'arrière.

L'excavation au front s'est effectuée en totalité en pleine section ; le creusement des caniveaux latéraux s'est effectué en même temps, en arrière par rapport au front ; les principales phases ont été les suivantes :

- ◆ foration de la volée ;
- ◆ chargement ;
- ◆ tir ;
- ◆ ventilation ;
- ◆ marinage ;
- ◆ purge ;
- ◆ soutènement immédiat par béton projeté fibré (fibre acier Dramix) ;
- ◆ mise en place des boulons et du treillis soudé, éventuels ;
- ◆ soutènement à l'arrière par béton projeté non fibré.

A l'arrière du front, les ateliers suivants sont exécutés :

- ◆ à 150 m du front de taille :
  - déblaiement des caniveaux (préalablement tirés en même temps que la volée du front),
  - mise en place du béton de propreté des caniveaux et du béton de roulement sur la chaussée ;
- ◆ à 250 m du front de taille :
  - bétonnage des banquettes fondations du revê-

## Géologie, géotechnique

Le projet de tunnel est situé dans la zone primaire axiale des Pyrénées. Celle-ci est constituée de terrains antéhercyniens recouverts en discordance par des formations "rouges" du permien associées au volcanisme du pic du Midi d'Ossau. La structure géologique actuelle résulte de la tectonique hercynienne d'âge permocarbonifère, et de la tectonique alpine d'âge postéocène moyen. Les principales formations géologiques (paléozoïques) rencontrées par le tunnel sont les suivantes de la tête nord à la tête sud (figure 5) :

- ◆ permien (PM 0 à 30) : alternance de grès, calcaires lacustres et schistes rouges ;
- ◆ carbonifère (PM 30 à 3267) : grès et schistes noirs (faciès culm), calcaires noirs du namurien ;
- ◆ dévonien (PM 3267 à 7287) : pélites, grès, calcaires coralliens, séries de schistes, grès et calcaires intercalés ;
- ◆ carbonifère (PM 7287 à 8597) : grès grauwackeux (faciès culm), calcaires noirs du namurien, calcaire "Griotte".

Les résistances à la compression simple varient de 30 MPa (schistes) à 84 MPa (calcaires noirs). La fracturation est généralement faible à moyenne (RDQ de 60 à 90).

Plusieurs failles recoupent le tracé du tunnel, les plus significatives se situant en Espagne : faille de Candanchu (50 m, remplissage bréchiq), faille de la Grande Piste, faille hercynienne de la Pena del Aiguilla, faille de la Fuerte de Coll Ladronez (zone mylonitisée), faille de Canfranc.

### Soutènements prévus

Six familles de soutènements sont prévues en fonction des terrains rencontrés :

- ◆ profil P1 : boulons, béton projeté 12 cm ;
- ◆ profil P2 : boulons, treillis soudé, béton projeté 23 cm ;

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### Côté France :

#### Maître d'ouvrage

Ministère de l'Équipement, du Transport du Logement et du Tourisme représenté par la DDE des Pyrénées-Atlantiques

#### Maître d'œuvre

DDE des Pyrénées-Atlantiques, assistée du CETU, de Scetauroute associée à SETEC

#### Entreprises

Groupement Razel (mandataire pilote), Pico, Ducler, Entrecanales

### Côté Espagne :

#### Maître d'ouvrage

Ministère des Travaux Publics (Moptma)

#### Maître d'œuvre

Direction générale des Routes d'Aragon

#### Entreprises

Groupement Entrecanales (mandataire), Pico, Razel, Ducler

tement définitif du tunnel.

- ◆ à 450 m du front de taille :
  - pose du complexe d'étanchéité;
- ◆ à 500 m du front de taille :
  - bétonnage des banquettes fondations du revêtement définitif du tunnel.

## Matériel

Les matériels utilisés sur le chantier sont les suivants :

- ◆ foration : jumbo robotisé Robofore Montabert, 3 bras, foration (maxi 5,50 m de profondeur) de l'ensemble de la section en une seule station;
- ◆ chargement : plate-forme élévatrice à ciseaux rotative Semafor;
- ◆ ventilation :
  - 1 double ventilateur extérieur (2 x 200 kW) soufflant dans gaine Ø 3000,
  - 1 ventilateur (132 kW) sur portique à l'avancement pour aspiration des gaz et fumées dans gaine Ø 2000;
- ◆ marinage : 1 chargeur Cat 980 (godet 3 m<sup>3</sup>), 6 dumpers articulés DJB 25;
- ◆ purge : pelle Cat 214 équipée d'un BRV 32;
- ◆ béton projeté : robot de projection avec nacelle et pompe (20 m<sup>3</sup>/h) Semafor;
- ◆ boulonnage : 2 boulonneurs Atlas Copco Boltec C32F4 (boulons à la résine, 4 m de longueur maxi);
- ◆ pose de cintre : nacelle élévatrice Semafor - Dieci, possédant une pince érecteur de cintre;
- ◆ manutentions diverses : chariot élévateur Merlo P27/7.

## Organisation du travail

Le travail s'est effectué à trois postes de 8 heures du lundi 5 h au samedi 5 h. Dans la phase normale du chantier, l'effectif total était de 25 personnels mensuels et de 120 personnels horaires, y compris sous-traitants.

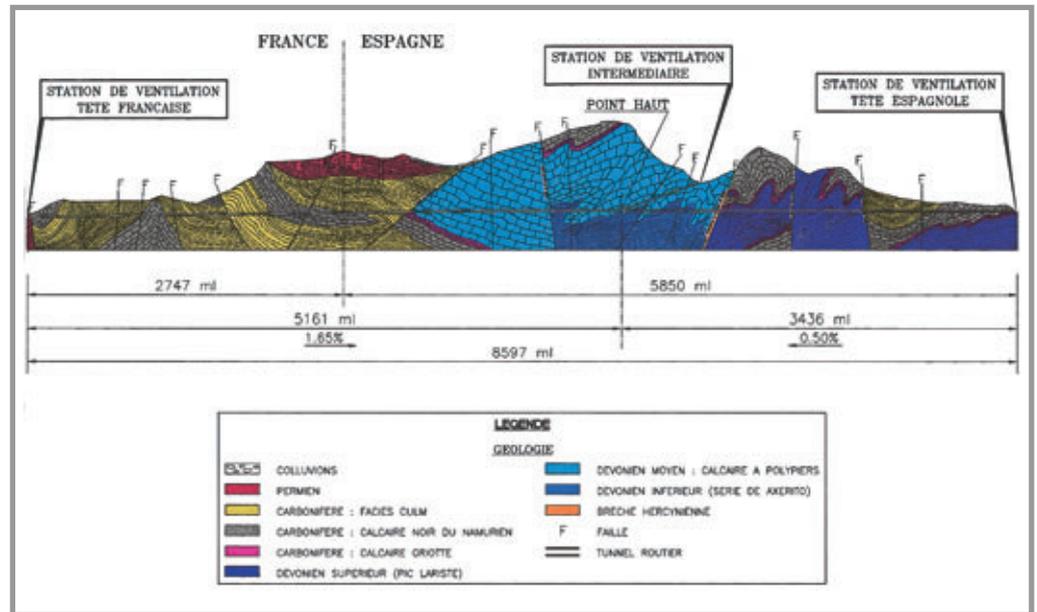
## Programme des travaux

Les travaux, d'un délai d'exécution global de 32 mois, ont été perturbés dès le démarrage par un ajournement des travaux de 10 mois faisant suite à l'annulation de la déclaration d'utilité publique. L'exécution de la partie française a été réalisée le 26 juillet 1996. L'ouvrage côté français a été réceptionné le 25 septembre 1997.

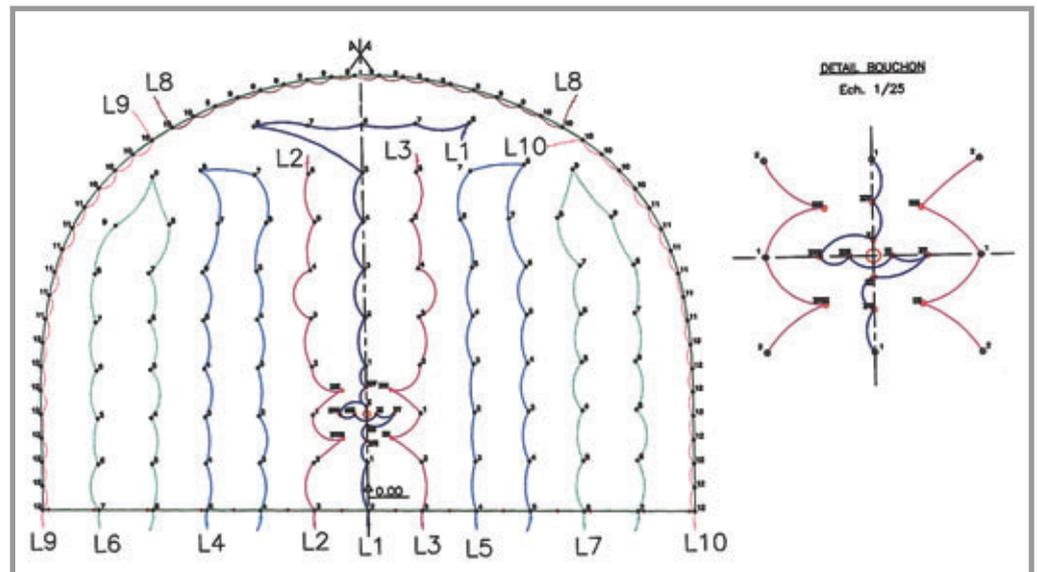
## ■ CREUSEMENT À L'EXPLOSIF

### Explosif

L'explosif utilisé était de la gomme F16 encartouchée, associée pour tous les trous périphériques à des cordeaux détonants. La gomme était condi-



**Figure 5**  
Principales formations géologiques de la tête nord à la tête sud  
*Main geological formations from the north head to the south head*



**Figure 6**  
Plan de tir  
*Blasting plan*

tionnée en cartouches de Ø 40, 35 et 25 mm. Le stockage des explosifs et accessoires comprenait :

- ◆ cinq dépôts de troisième catégorie (capacité de 50 kg chacun) étaient disposés sur le chantier et servaient uniquement à stocker les reliquats éventuels (la consommation journalière d'explosif était livrée chaque matin);
- ◆ un dépôt de troisième catégorie pour les détonateurs (capacité 12500 unités);
- ◆ deux locaux spécialement aménagés pour le pré-conditionnement des charges.

### Plan de tir (figure 6)

Le tir était réalisé en pleine section de manière séquentielle, suivant 10 séquences espacées de 25 ms (exploseur Nobel). Les charges maximum instantanées variaient de 5 kg à 15 kg, réparties en 4 à 5 trous maximum pour l'abattage, 10 trous pour le découpage.



Les plans de tir ont été adaptés en permanence aux conditions de terrains. 85 plans de tir différents ont été utilisés et 240 adaptations en fonction du terrain rencontré, avec un nombre de trous variant entre 130 + 2 et 180 + 2. Le découpage s'est effectué avec des trous espacés de 0,40 m. La foration des trous s'est effectuée dans les diamètres suivants :

- ◆ bouchons : 2 gros trous de Ø 127 mm ;
- ◆ autres trous : Ø 48 mm.

La consommation d'explosif s'est située, en fonction des terrains, de 1,4 kg/m<sup>3</sup> à 0,9 kg/m<sup>3</sup>.

### Volées

La longueur de volées variait entre 2,00 m et 5,50 m, suivant les profils de soutènement prévus.

## ■ LES RÉSULTATS

### Jumbo robotisé

Après une période de mise au point et de mise en cadence, le jumbo robotisé associé au tir séquentiel a donné dans les terrains de type P1, des résultats relativement satisfaisants, en particulier en ce qui concerne le découpage de la section et les hors profils. Dans les terrains carbonifères facies culm (schistes, grès schisteux...) de type P2 ou P2 renforcé, malgré un découpage périphérique réalisé avec des trous très serrés (chargés ou non chargés), le gain en matière de hors profils lié à l'utilisation du jumbo robotisé n'est pas apparu de manière évidente. Dans ce cas, c'est le terrain qui conditionne le découpage. Néanmoins, cette méthode reste un facteur favorable.

### Avancements

Dans la zone d'entrée du tunnel exécutée dans le Permien en 1/2 section cintrée, l'avancement a été de 2,35 m/jour. Dans le culm en pleine section sur 2 055 m, la moyenne s'est établie à 5,50 m/j. Dans le calcaire du namurien en pleine section, sur 760 m, la moyenne s'est établie à 8,85 m/j avec des avancements supérieurs à 12 m/j.

## ■ CONCLUSION

En terme de bilan technique, le tunnel du Somport peut être considéré comme une réussite par :

- ◆ la rareté des accidents du travail pour un ouvrage de cette importance ;
- ◆ la qualité de l'ouvrage fini.

Une telle réussite ne peut être atteinte que si l'ensemble des intervenants suit un objectif commun.

## ENGLISH SUMMARY

### The French part of the Somport tunnel

G. Cueille

The stretch between Pau and Saragossa via highway RN 134 and the Somport pass (altitude 1,632 m) constitutes one of Europe's four transpyrenean routes. The excavation of the tunnel under the Somport pass falls within the framework of the modernisation of this route : this two-way tunnel will allow the crossing of the Pyrenees barrier at an altitude slightly lower than 1,200 m without exposure to the uncertainties of winter.

## DEUTSCHES KURZREFERAT

### Französischer Teil des Somport-Tunnels

G. Cueille

Die Verbindung Pau - Saragossa über die Nationalstraße RN 134 und den Somport-Paß (1632 m über NN) ist eine der vier europäischen Verkehrsachsen über die Pyrenäen. Die Tunnelbohrung unter dem Somport-Paß gehört zu den Modernisierungsmaßnahmen dieser Achse : dieser Tunnel wird die Überquerung der Pyrenäen in beide Richtungen, in unter 1 200 m Höhe geschützt vor den meteorologischen Widrigkeiten des Winters, ermöglichen.

## RESUMEN ESPAÑOL

### El tramo francés del túnel del Somport

G. Cueille

El itinerario Pau - Zaragoza por la carretera nacional RN 134 y el puerto del Somport (altitud : 1 632 m) constituye uno de los cuatro ejes de comunicaciones europeas transpirenaicos. La excavación de un túnel bajo el puerto del Somport entra en el marco de la modernización de este eje de comunicaciones : este túnel bidireccional permitirá franquear la barrera formada por los Pirineos a una altitud poco inferior de los 1 200 m, al resguardo de las incertidumbres invernales.



# Un tunnel routier sur la RD 148

## Le tunnel de Boulc-en-Diois

La RD 148, coupée à la suite d'un glissement de terrain survenu en janvier 1994, isole le village de Boulc-en-Diois situé dans l'arrière pays du Diois, du chef-lieu Châtillon-en-Diois (distant de 7 km). Quatre solutions sont étudiées. Pour des raisons de sécurité la solution d'un tunnel routier, comportant trois galeries hydrauliques est retenue, compte tenu du risque majeur hydraulique existant par la présence du ruisseau "le Boulc" au bas de la falaise. Dans l'attente de trouver le financement de l'opération : 56 millions de francs, les habitants de Boulc-en-Diois empruntent un ancien chemin forestier par le Col de Miscon (1023 m) distant de 25 km du chef-lieu.

Les travaux débutent en septembre 1996, pour une durée de 18 mois. Le tunnel d'une longueur de 840 m, avec une pente moyenne de 10 %, dégagé 6 m de largeur roulable, avec un gabarit de 4,30 m. Il comporte trois galeries hydrauliques de 20 m<sup>2</sup> chacune de section. Le financement est assuré par le département de la Drôme, l'Etat, la région et l'Union européenne. Le tunnel est ouvert à la circulation le 24 décembre 1997. Ce chantier a été suivi par la subdivision ETN1 du Service technique départemental.

### ■ HISTORIQUE

Un important glissement de terrain survient le 11 janvier 1994 sur le versant dit de "Ravel", emportant la route départementale RD 148 et isolant le petit village de Boulc-en-Diois (75 habitants) de son chef-lieu Châtillon-en-Diois, distant de 7 km (photo 1 et figure 1).

### Solution d'attente

La population, alors privée de route, doit emprunter un ancien chemin forestier, par le col de Miscon, remis partiellement en état par le service technique du conseil général de la Drôme (S.T.D.). Mais ce circuit, plus long de 18 km, de circulation difficile en hiver, ne peut être que provisoire. Très vite les élus du département se mobilisent, afin de trouver une solution.

### Mais quelle solution ?

Quatre possibilités sont envisagées :

- ◆ utilisation de la route forestière par le col de Miscon (altitude 1023 m) : distante de 24 km du chef-lieu et obligation d'un équipement routier en période hivernale ;
- ◆ réhabilitation de la route coupée RD 148 : risque de déclencher la remise en mouvement des sols et d'accélérer le glissement ;
- ◆ route en encorbellement : le creusement présente des risques de chutes de blocs et d'écaillles



Photo 1  
RD 148 après  
l'éboulement  
Highway RD 148  
after the landslide

rocheux, la falaise de Soubreroche étant calcaire et fortement altérée ;

- ◆ route en tunnel : bien que cette solution soit la plus onéreuse, elle est retenue.

### Un tunnel, pourquoi ?

#### Le risque hydraulique

La présence du ruisseau "le Boulc", au bas de la falaise, présente un risque majeur hydraulique pour la vallée. En effet, d'autres glissements de terrain ne sont pas à exclure dans l'avenir. Des blocs pourraient obstruer la vallée et constituer un barrage de 20 à 40 m de hauteur. Le Bureau central d'études pour les équipements d'outre-mer (BCEOM), chargé de cette étude, confirme ce risque hydraulique

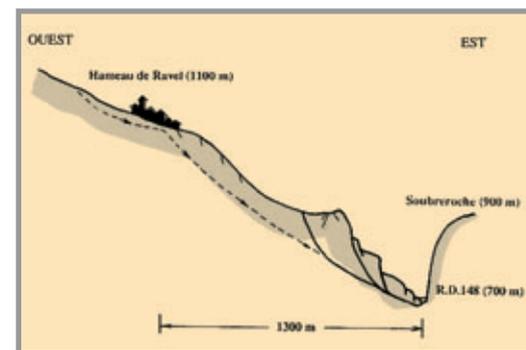
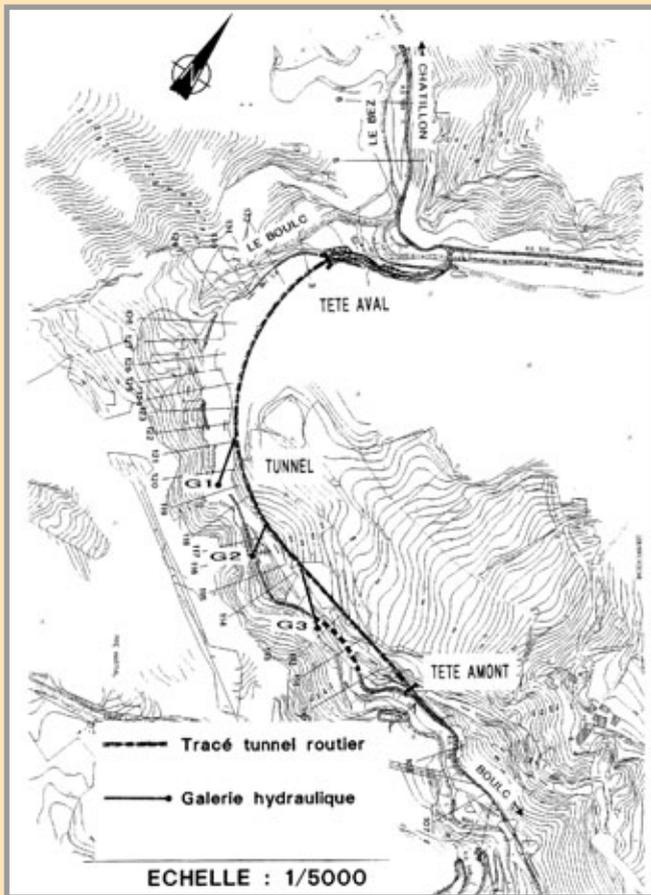
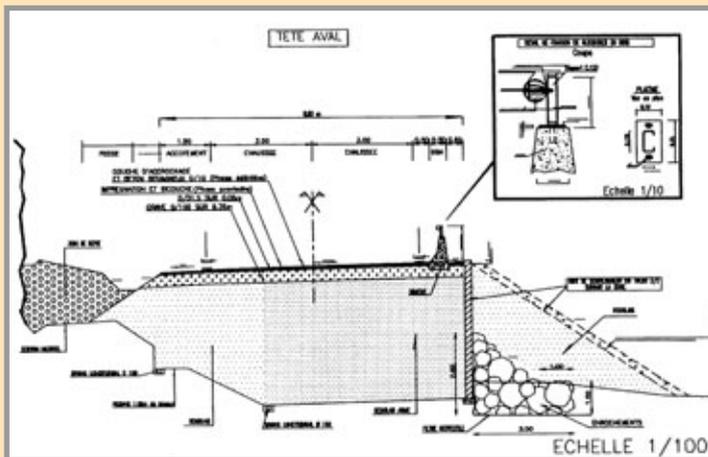


Figure 1  
Situation des lieux.  
RD 148

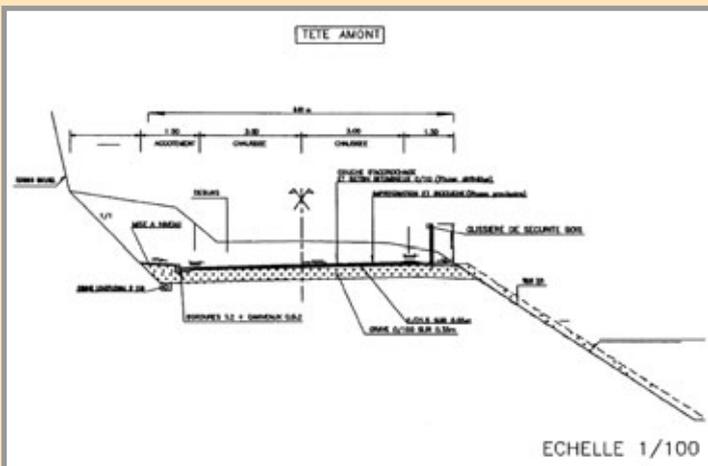
Location of site  
on RD 148



**Figure 2**  
Plan synoptique  
des travaux  
*Diagram of works*



**Figure 3**  
Profil en travers  
type hors tunnel  
"tête aval"  
*Typical cross  
section outside  
of tunnel  
"downstream"*



**Figure 4**  
Profil en travers  
type hors tunnel  
"tête amont"  
*Typical cross  
section outside  
of tunnel  
"upstream"*

et précise que la retenue pourrait atteindre en quelques heures des volumes variant entre 164 000 m<sup>3</sup> à 3 770 000 m<sup>3</sup>. Ce barrage pourrait alors céder brutalement et submerger les secteurs en aval, notamment le chef-lieu Châtillon-en-Diois et d'autres villages. La seule solution, pour se prémunir d'une telle catastrophe, consiste à créer des galeries hydrauliques se branchant dans le tunnel et pouvant évacuer l'eau de la retenue.

**Coût et financement**

La construction du tunnel : 800 m + 3 galeries hydrauliques coûte 56 millions de francs (MF) TTC. En juillet 1994, le conseil général de la Drôme se prononce en faveur de ce projet, sous réserve d'obtenir des aides de l'Etat, de l'Union européenne et de la région. Son président, Jean Mouton, multiplie ses démarches auprès des ministères à Paris, ainsi qu'à Bruxelles, pour que ce dossier aboutisse, faisant valoir la sécurité publique. En mars 1996, la décision intervient, confirmée par le ministre de l'Aménagement du territoire.

**Projet de financement**

- ◆ Département : 17 MF;
- ◆ Etat : 11,50 MF;
- ◆ Union européenne : 10 MF;
- ◆ Région : 8 MF.

**Soulagement**

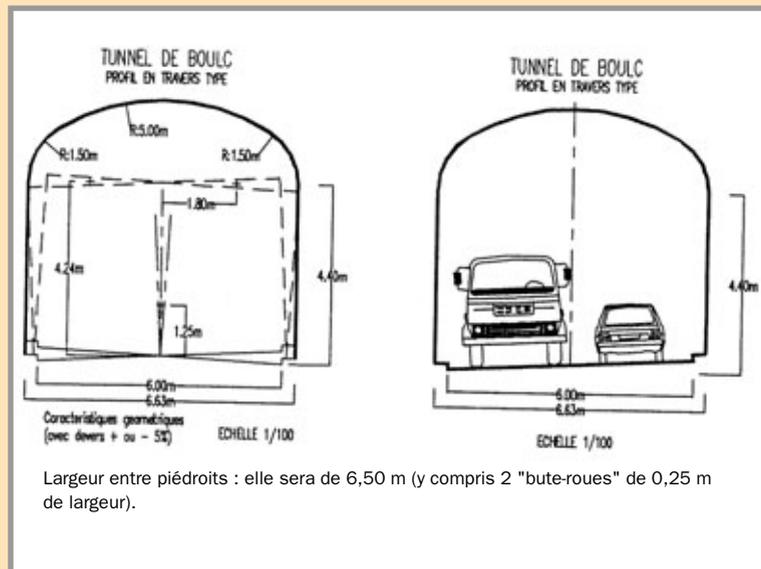
Les habitants de Boulc-en-Diois, retirés dans l'arrière pays du Diois, sont enfin rassurés et satisfaits de cette décision : la construction d'un tunnel routier ce qui met fin à leur sentiment d'isolement. Ce tunnel permet en effet, de rétablir la circulation par la RD 148, avec une liaison directe (7 km) entre Boulc et Châtillon-en-Diois.

**■ ÉTUDES ET PROGRAMMATION DES TRAVAUX**

Les consultations d'entreprises commencent en mai 1996. Les enquêtes préalables à la déclaration d'utilité publique et parcellaire sont lancées en juin 1996. Durée prévisionnelle des travaux : 18 mois.

**■ LES TRAVAUX**

Les travaux débutent en septembre 1996. La première phase consiste à purger et à consolider la falaise au-dessus des têtes "aval" et "amont" du tunnel. Le 12 décembre 1996 a lieu le premier tir à l'explosif, marquant le percement en tête "aval" du tunnel (photo 2).



**Figure 5**  
**Profil en travers tunnel**  
**Cross section of tunnel**

## Terrains rencontrés

Les terrains recoupés lors du creusement sont composés de terrains du Crétacé : Turonien supérieur - Coniacien. Cette formation compacte est composée de conglomérats calcaires à gros éléments liés par un ciment calcaire et comportant des poches de marnes.

Il a été trouvé quelques puissantes lentilles de grès quartzeux, ainsi que des silex. L'état moyen des terrains, en classification AFTES (Association française des travaux en souterrain), sont classés en rocher sain (AM1) charge hydraulique, faible (H1), densité faible (ID2), résistance élevée (R2) et contraintes faibles (CN1). Leur traversée a nécessité trois types de soutènement :

- ◆ soutènement "léger" par boulons d'ancrage en faible densité (1 à 4 U par ml) associé à 10 cm de béton projeté ;
  - ◆ soutènement "moyen" par boulons d'ancrage en densité moyenne, (4 à 6 U par ml) associé à 15 cm de béton projeté fibré ;
  - ◆ soutènement "lourd" par cintres HEB 140 avec plaques de blindage.
- (Figures 2, 3, 4).

## Fournitures utilisées

- ◆ Explosif : 65 t ;
- ◆ Cintres :
  - tunnel : 120 unités posées (98 t),
  - galeries : 17 unités posées (10 t) ;
- ◆ Boulons à ancrage ponctuel : 440 unités ;
- ◆ Boulons résine : 2 450 unités ;
- ◆ Béton projeté : 3 000 m<sup>3</sup> ;
- ◆ Blindage : 30 t ;
- ◆ Déblais : 47 000 m<sup>3</sup> ;
- ◆ Anneaux béton : 3 000 m<sup>3</sup> B30.



**Photo 2**  
**Tête aval du tunnel**  
**(pose de cintres)**  
**Downstream head of tunnel**  
**(placing of arches)**

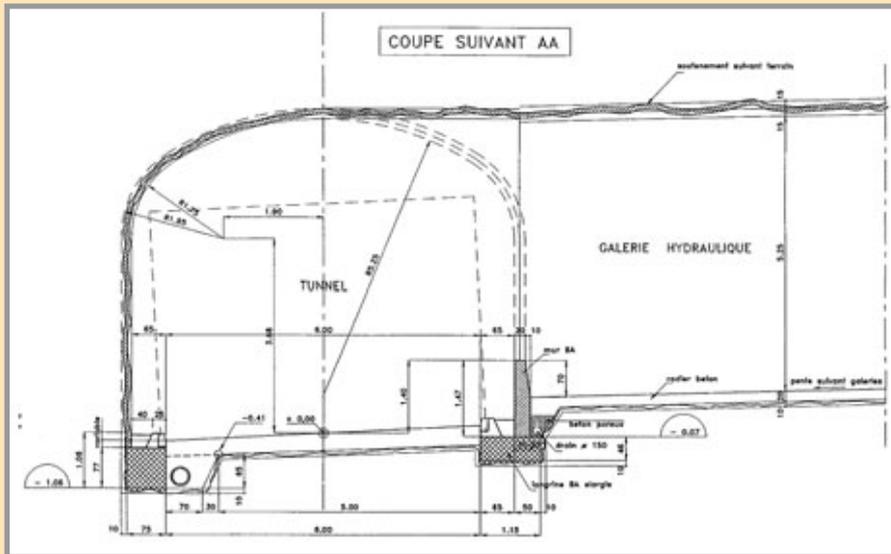
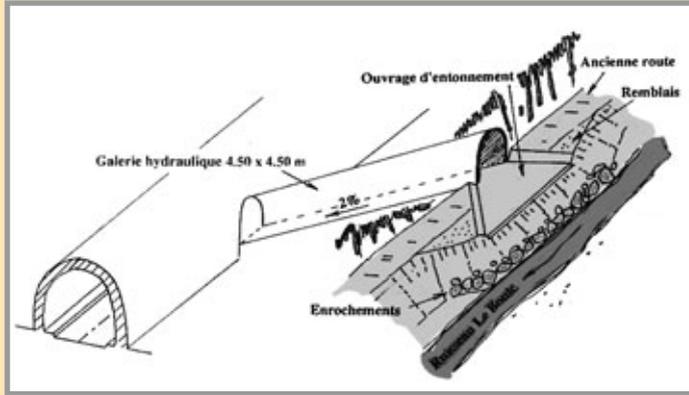
## Caractéristiques géométriques du tunnel routier

- ◆ Altitude de la tête amont (côté Boulc) : 753,30 MGF ;
- ◆ Altitude de la tête aval (côté RD 539) : 675,43 NGF soit un dénivelé de 77,87 m ;
- ◆ Pente moyenne de la chaussée : 9,73 % ;
- ◆ Gabarit dégagé : minimum 4,30 m ;
- ◆ Chaussée roulante : 2 voies de 3,00 m ;
- ◆ Abris piétons : en quinconce tous les 50 m ;
- ◆ Zones étanchées et revêtues en béton sur 100 ml aux têtes "aval" et "amont" ;
- ◆ Longueur du tunnel réalisé : 840 m (figure 5).

## Caractéristiques géométriques des galeries hydrauliques

- ◆ Gabarit : 4,50 m x 4,50 m, soit environ 20 m<sup>2</sup> de section ;

**Figure 6**  
Galerie hydraulique  
*Hydraulic gallery*



**Figure 7**  
Jonction galerie tunnel  
*Junction between gallery and tunnel*



**Photo 3**  
Intérieur du tunnel (pose des bordures)  
*Inside of tunnel (placing of curbs)*



**Photo 4**  
Intérieur tunnel terminé (avril 98)  
*Inside of tunnel completed (April 98)*



**Photo 5**  
Extérieur tunnel  
(avril 98)  
*Outside of tunnel  
(April 98)*

- ◆ Raccordement au tunnel routier : chute au moins égale à 1,50 m ;
- ◆ Galerie n° 1 : pente = 3 % sur 46,61 m ;
- ◆ Galerie n° 2 : pente = 13,3 % sur 32,66 m ;
- ◆ Galerie n° 3 : pente = 9,44 % sur 37,46 m. (Figures 6 et 7).

## ■ FIN DU CHANTIER

Le 4 septembre 1997, dernier tir à la dynamite : percement de la tête "amont". Les Boulcois, tous présents ce jour-là, aperçoivent enfin le bout du tunnel et laissent "exploser" leur joie.

A la demande du conseil général, les entreprises mettent tout en œuvre, afin d'ouvrir ce tunnel à

la circulation pour Noël. Est-ce possible ? Et bien oui ! Le 24 décembre 1997 c'est l'inauguration. Le tunnel est terminé, ouvert au trafic des véhicules légers jusqu'à fin janvier, pour permettre les aménagements intérieurs : éclairage, bordures, signalisation... (photo 3).

Depuis, les poids lourds et V.L. circulent normalement sur la RD 148. Seuls quelques aménagements extérieurs au tunnel se terminent (photos 4 et 5).

Il est à noter que MM. André Brun, Robert Desgranges, Eric Piozin de la subdivision ETN1 du S.T.D. ont assuré les études et le suivi de ce chantier. Les délais prévus d'achèvement des travaux sont respectés, ainsi que le coût de l'opération. Pari gagné !

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### **Maitre d'ouvrage**

Département de la Drôme

### **Maitre d'œuvre**

Service technique départemental (subdivision ETN1)

### CABINETS D'ÉTUDES ET ENTREPRISES

#### **Maitrise d'œuvre "surveillance de jour et de nuit"**

Scetauroute/SMM

#### **Etude du projet tunnel et galeries hydrauliques - Assistance au maître d'œuvre**

CETU

#### **Etude des protections contre les éboulements rocheux**

SETE

#### **Mission de coordination de sécurité et de protection de la santé**

E.u.r.l Virage

#### **Travaux de protection contre les éboulements**

Elite

#### **Construction du tunnel routier et des galeries hydrauliques**

Sotrabas avec les sous-traitants :

- Simecsol
- Etandex
- GIE Diois TP
- Grisal TP
- Sapec
- Europe Etudes Gecti

#### **Mission de suivi géologique**

Geoplus

#### **Mesures et contrôles des vibrations**

CETE de Lyon

#### **Mesures et suivi des convergences**

Syntegra

#### **Travaux éclairage public du tunnel, et réseaux de branchement extérieurs au tunnel**

ETDE

#### **Travaux extérieurs**

- GIE Diois/SA Cheval
- S.R. du Midi

## ENGLISH SUMMARY

### **A tunnel on highway RD 148**

#### **The tunnel of Boulc-en-Diois**

E. Fegy

Highway RD 148, blocked after a landslide in January 1994, separates the village of Boulc-en-Diois, located in the hinterland of Diois, from the town of Chatillon-en-Diois (7 km away). Four solutions were examined. For safety reasons, the solution of a highway tunnel with three hydraulic galleries was adopted, considering the major hydraulic risk represented by the "le Boulc" stream at the bottom of the cliff. Until funds are found for the operation (FF56 million), the inhabitants of Boulc-en-Diois use an old forest path via the Miscon pass (altitude 1,023 m) which is 25 km from Chatillon-en-Diois.

The works began in September 1996, to last 18 months. The tunnel is 840 m long, with an average slope of 10 %, a riding width of 6 m, with a gauge of 4,30 m. It has three hydraulic galleries of 20 sq. m section each. Financing is provided by the Drôme Department, the State, the region and the European Union. The tunnel was opened to traffic on 24 December 1997. This project was followed by the ETN1 subdivision of the Departmental Technical Service.

## DEUTSCHES KURZREFERAT

### **Straßentunnel der Landstraße RD 148 in Boulc-en-Diois**

E. Fegy

Durch einen Erdbeben an der Landstraße RD 148 im Januar 1994 wurde das Dorf Boulc-en-Diois im Dioiser Hinterland von der 7 km entfernten Bezirkshauptstadt Châtillon-en-Diois abgeschnitten. Vier Lösungen sind untersucht worden. Aus Sicherheitsgründen (Vorliegen des durch das Flüsschen Boulc am Fuße des Steilhanges bedingten beträchtlichen Erdbebenrisikos) ist die Entscheidung zugunsten eines Straßentunnels mit drei Wasserstollen gefallen. Während die Finanzierung für das Projekt erarbeitet wurde (56 Mio. franz. Francs), bestand die einzige Verbindung (25 km) der Anlieger mit der Bezirkshauptstadt in einem ehemaligen Forstweg über den Miscon-Paß in 1023 m Höhe über NN.

Die insgesamt 18 Monate dauernden Bauarbeiten starteten im September 1996. Der 840 m lange Tunnel mit einer mittleren Neigung von 10 % weist 6 m Fahrbahn und eine Höhe von 4,30 m auf. Er beinhaltet drei Wasserstollen mit je 20 m<sup>2</sup> Querschnitt. Die Finanzierung wurde vom Département Drôme, vom französischen Staat, von der Region und von der europäischen Union übernommen. Seit dem 24. Dezember 1997 ist der Tunnel für den Verkehr freigegeben. Die Baumaßnahme wurde von der Unterabteilung ETN1 der Technischen Dienststellen des Départements gedeckt.

## RESUMEN ESPAÑOL

### **Un túnel viario en la carretera RD 148 El túnel de Boulc-en-Diois**

E. Fegy

La carretera nacional RD 148, cortada a raíz de un deslizamiento del terreno, acaecido en enero de 1994, había dejado incomunicado al pueblo de Boulc-en-Diois situado al fondo de la región del Diois, de la cabeza de partido Châtillon-en-Diois (a una distancia de 7 km). Se han estudiado cuatro soluciones. Por motivos de seguridad, se ha adoptado la solución de un túnel, que incluye cuatro galerías hidráulicas, habida cuenta del riesgo importante desde el punto de vista hidráulico debido a la presencia del arroyo "el Boulc", en la parte inferior del acantilado. En espera de encontrar la financiación de la operación : 56 millones de francos, los habitantes de Boulc-en-Diois, utilizan un antiguo camino forestal que pasa por el puerto de Miscon (1023 m) distante de 25 km de la cabeza de partido.

Las obras dieron comienzo en septiembre de 1996, para una duración de 18 meses. El túnel, de una longitud de 840 m, con un declive de promedio de un 10 %, presenta una anchura de 6 m útiles para el tráfico rodado, con un gálibo de 4,30 m. Consta de tres galerías hidráulicas de una sección de 20 m<sup>2</sup> cada una. La financiación corre a cargo del departamento del Drôme, el Estado, la región y la Unión Europea. El túnel fue abierto al tráfico el 24 de diciembre de 1997. Estas obras fueron seguidas por la subdivisión ETN1 del servicio técnico departamental.

# Autoroute A 20

## Le tunnel de Pech

Ce tunnel comportant deux tubes de 246 m et 206 m a été réalisé en variante pleine section en méthode de prédécoupage mécanique avec prévoûtes. La section totale excavée de 155 m<sup>2</sup> constitue un record d'excavation avec la méthode Perforex. Les terrains traversés (argiles, marnes et molasses du Stampien) ont été conformes à l'étude géologique et géotechnique préalable. Des mouvements d'ensemble du massif lors de l'excavation des têtes, l'alternance de poches de sable, la présence de nombreux plans de glissement et d'eau au démarrage du tube Est, ainsi qu'un chargement dissymétrique du soutènement en section courante ont conduit à prendre des mesures de confortement supplémentaires. Mais dans l'ensemble, la parfaite collaboration entre maître d'œuvre, conseils, entreprises, ayant la confiance du maître d'ouvrage a permis de surmonter ces problèmes dans le respect des délais, de la qualité et de la sécurité, ce qui confirme *a posteriori* le choix judicieux de la méthode.



**Photo 1**  
Avant-plan : réalisation de la contre-voûte et des banquettes

*Foreground: completing the counter-arch and the benches*

L'ensemble de cet article s'attache à présenter le tunnel de Pech Brunet, à décrire son environnement, son contexte géologique et géotechnique ainsi que le déroulement des travaux.

### ■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le tunnel de Pech Brunet est situé dans le Tarn-et-Garonne sur la commune de Montpezat-de-Quercy. C'est le seul ouvrage souterrain de la section Montauban - Cahors Sud de l'autoroute A 20, destinée à relier à terme, Montauban à Brive.

### ■ JUSTIFICATION DE L'OUVRAGE

L'A.P.S. de l'autoroute A 20 prévoyait le passage de la butte de Viandès par un déblai de 330 m de longueur et de 32 m de hauteur maximale, en passant au-dessus du tunnel SNCF, franchissant cette même butte sur la ligne Toulouse - Paris. L'étude de l'incidence du déblai sur le tunnel existant, menée en concertation avec la SNCF, a montré que la traversée en tranchée de l'autoroute, au droit de la butte de Viandès, devait conduire à diminuer sensiblement les contraintes verticales au niveau du tunnel SNCF et de ce fait, entraîner une remontée sensible de l'ouvrage SNCF. Une étude aux éléments finis a été réalisée pour estimer l'amplitude des déplacements à attendre sur le tunnel SNCF. Le calage des paramètres géotechniques a été réalisé suivant deux profils correspondant à deux positions critiques du déblai par rapport au tunnel ferroviaire, à partir de la synthèse de la campagne géologique et géotechnique et par l'analyse en retour des mesures de contraintes dans le revêtement du tunnel. Les calculs ont mis en évidence des déplacements pluricentimétriques d'ensemble au droit des profils étudiés, accompagnés de déformations centimétriques du revêtement traduisant un phénomène d'ovalisation.

Les amplitudes des déplacements et des déformations prévisibles sont apparues difficilement compatibles avec les exigences de sécurité de la SNCF. Ainsi, les conclusions de l'étude ont conduit à rechercher une solution en tunnel pour l'autoroute afin de perturber au minimum l'état des contraintes autour du tunnel SNCF, ainsi qu'au voisinage de la tête nord pour les problèmes de stabilité de talus. La prise en compte de ces impératifs et des contraintes géologiques vis-à-vis de l'excavation du tunnel a conduit à remonter le profil en

long d'environ 1,50 m par rapport à celui qui était prévu pour le passage en grand déblai.

Enfin, les calculs analytiques de l'effet de l'excavation des deux tunnels autoroutiers sur le tunnel SNCF ont mis en évidence des perturbations très faibles des contraintes dans le terrain encaissant le tunnel SNCF. L'étude aux éléments finis a confirmé cette très faible amplitude des déformations. Une autre justification de l'ouvrage concerne son environnement général. En effet, la construction d'un tunnel a permis de limiter l'impact sur l'environnement en respectant une station botanique identifiée par les spécialistes et classée Z.N.I.E.F.F. (Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique).

### ■ PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Le projet de la section autoroutière a été établi conformément à l'Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison (ICTAAL) avec une vitesse de référence de 120 km/h et deux chaussées à deux voies + BAU à l'ouest et trois voies à l'est. L'ouvrage comporte deux tubes dont les longueurs des différentes parties d'ouvrage sont reprises dans le tableau I.

#### Géométrie

##### Tracé en plan

Au droit de la butte de Viandès, l'axe de l'autoroute A 20 suit sur une longueur de 568 m un rayon de 1800 m encadré par deux clothoïdes de paramètre  $A = 900$ .

Les tracés en plan des chaussées, définis sur les axes en bord gauche des chaussées se présente comme suit :

- ◆ tube Est : rayon de 1 788 m ;
- ◆ tube ouest : rayon de 1 805 m.

La largeur minimale de terrain restant en place entre les excavations des deux tubes est de 10,80 m.

##### Profil en long

Le profil en long présente une pente vers le sud variant de 0,7 % au nord à 2,3 % au sud. Le tube Est est décalé sur la ligne rouge de - 0,175 m en altitude par rapport au tube ouest. La couverture maximale est de 22 m.

##### Profil en travers type

La largeur roulable en tunnel est de 12 m pour le tube Est et de 10,50 m pour le tube ouest.



**Photo 2**  
Têtes sud en cours  
de réalisation  
*South heads under  
construction*



**Photo 3**  
Têtes sud  
terminées  
*South heads  
completed*

Lithostratigraphie	Stratigraphie
Couche n°1 : calcaire supérieur	Calcaire blanc de l'Agenais (Chattien)
Couche n°2 : marnes intermédiaires	Molasse de Caratié (Stampien - Chattien)
Couche n°3 : calcaire inférieur	Calcaire de Cieurac (Stampien)
Couche n°4 : calcaire mameux et marnes calcaires	Molasse de l'Agenais (Stampien)
Couche n°5 : argiles et marnes	Molasse de l'Agenais (Stampien)

**Tableau II**  
**Séries stratigraphiques**  
*Stratigraphic series*



L'architecte a différencié les têtes nord et sud par insertion de briques en plus grand nombre en partie haute des murs côté sud (côté Toulouse). Le béton blanc des murs de soutènement est matricé des deux côtés, l'ensemble étant plus dépouillé au nord, afin de rappeler la pierre blanche du Lot (photos 2 et 3).

### **Ouvrages extérieurs**

Des ouvrages extérieurs viennent compléter le tunnel. Le plus haut en altitude est le local incendie avec son réservoir d'eau qui dessert par des conduites en fonte ( $\varnothing$  150 mm) les bornes incendie des quatre têtes. Il est situé en bordure sud de la R.D.20 le long de laquelle cheminent l'alimentation en eau potable, l'énergie électrique (20000 V) ainsi que le téléphone.

Enfin, à la tête sud du côté est sont regroupés dans un local technique différentes fonctions : transformation électrique, relais divers, groupe électrogène, commandes automatiques des différents signaux. Au pied de cet ouvrage est enterré le bassin de rétention des hydrocarbures dont la fonction est de récupérer en système séparatif les éventuels résidus d'un accident en tunnel afin d'éviter toute pollution des bassins récupérant les eaux de ruissellement (pluie).

## **Géologie et géotechnique**

### **Géologie**

Le tunnel de Pech Brunet franchit la butte de Vian-dès qui appartient à l'unité des coteaux oligocènes. Plus particulièrement, la série stratigraphique va du Stampien (molasse de l'Agenais) au Chattien (calcaires blancs de l'Agenais). Il s'agit d'une structure tabulaire qui présente la morphologie caractéristique d'érosion des formations tertiaires avec reculées et escarpements plus accentués dans les niveaux durs rencontrés vers le sommet de cette série et versants aux reliefs adoucis dans les faciès molassiques (figure 3). Du sommet à la base, les caractéristiques lithologiques de cette série sont reprises dans le tableau II.

téristique d'érosion des formations tertiaires avec reculées et escarpements plus accentués dans les niveaux durs rencontrés vers le sommet de cette série et versants aux reliefs adoucis dans les faciès molassiques (figure 3). Du sommet à la base, les caractéristiques lithologiques de cette série sont reprises dans le tableau II.

Le creusement des deux tubes est effectué exclusivement dans le Stampien et essentiellement dans les argiles et marnes de la couche n° 5 dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

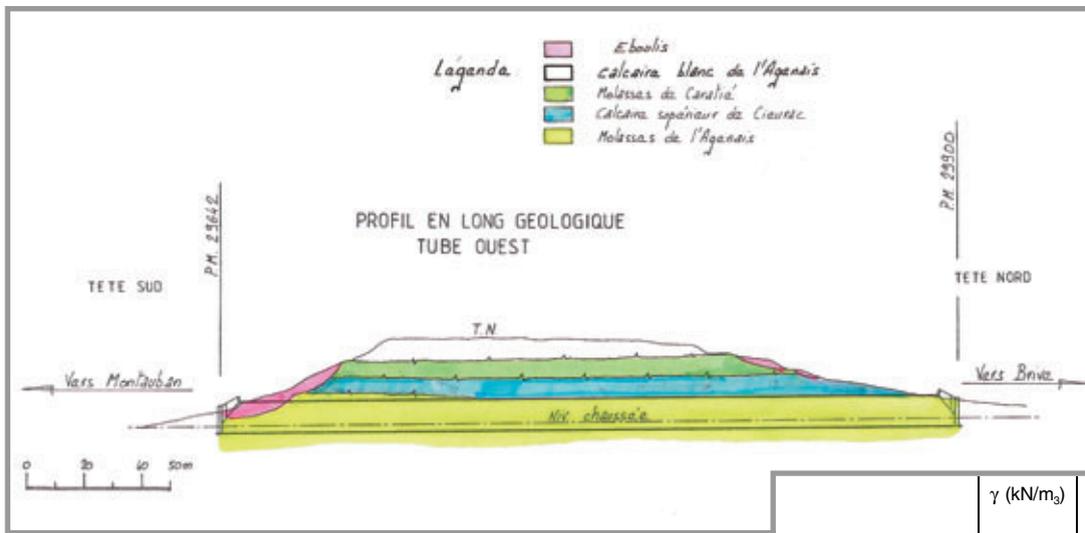
- ◆ la teneur moyenne en  $\text{CaCO}_3$  varie de 20 % à 40 % ;

- ◆ existence de passées, quelque fois plurimétriques, de sables plus ou moins propres, voire de grès. Ponctuellement, le mur de la couche n° 4 est également intéressé par la clé de l'excavation.

Du fait de leur genèse, ces dépôts détritiques présentent des variations latérales de faciès qui rendent difficile la prévision précise des faciès rencontrés lors de l'excavation ainsi que leur fréquence d'apparition sur la longueur des deux tubes.

Dans la zone intéressée par le projet, il n'a pas été détecté de donnée structurale particulière ou remarquable. Les principales discontinuités concernent les variations de faciès dans les molasses liées à des anciens chenaux et courants de dépôts et responsables éventuellement d'existence de stratifications obliques.

Au point de vue hydrogéologique, la structure générale de la butte est peu propice à de fortes circulations d'eau et celles-ci restent naturellement localisées au niveau des calcaires des couches n° 1 à 3. Il existe ainsi une ligne de sources au niveau du mur du calcaire de Cieurac (couche n° 3). La section excavée reste dans les molasses des couches n° 4 et 5, plus imperméables et il n'a pas



**Figure 3**  
**Profil en long**  
**géologique tube ouest**  
**Geological longitudinal**  
**profile, west tube**

été constaté, lors des phases d'excavation de venues d'eau significatives.

### Géotechnique

Les principales caractéristiques géotechniques des différentes couches utilisées dans les calculs sont précisées dans les tableaux III (tunnel courant) et IV (têtes). Plus particulièrement, les couches n° 4 et 5 dans lesquelles les tubes sont creusés ont des caractéristiques complémentaires correspondant aux principaux paramètres d'identification mécanique qui sont détaillées dans le tableau V.

La molasse de la couche 5 présente toute la gamme des faciès de sols fins, allant des sables plus au moins argileux aux argiles et marnes. La couche 4 quant à elle, est plus marnreuse. Les sols de ces deux couches peuvent être classés en sols compacts et surconsolidés s'étendant des argiles peu plastiques (A.P.) aux argiles très plastiques (AT). Seules les zones d'entrée du fait d'un confinement moindre présentent des caractéristiques plus faibles.

### Revêtement

La voûte du revêtement en béton coffré, non ferrailée, a une épaisseur de 50 cm et la contrevoûte, dimensionnée en fonction des pressions de gonflement prévisibles, et donc ferrailée, a une épaisseur de 60 cm.

### Drainage étanchéité

Pour pallier les risques de venues d'eau diffuses, le dispositif de drainage et d'étanchéité répond aux caractéristiques suivantes :

- ◆ mise en œuvre d'une étanchéité d'extrados par membrane synthétique ;
- ◆ mise en place d'un complexe drainant pour le captage des arrivées d'eau ;
- ◆ recueil des eaux à la base des piédroits par des drains munis de dispositifs de nettoyage.

### Collecte et évacuation des eaux

Les principes retenus sont les suivants :

- ◆ recueil des eaux de chaussées et éventuels déversements de matières dangereuses au moyen d'un caniveau à fente ;

	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_u$ (kPa)	$\phi_u$ (°)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$E_j$ (Mpa)	$E_\infty$ (Mpa)	$K_0$
Calcaire supérieur (couche 1)	23,0	500	35	250	45	100	75	0,40
Marnes intermédiaires (couche 2)	20,2	130	6	0	35	80	40	0,60
Calcaire inférieur (couche 3)	21,5	250	35	100	45	500	300	0,40
Marnes et marnes calcaires (couche 4)	21,4	270	6	50	35	160	80	0,75
Marnes et argiles (couche 5.1)	21,9	270	6	50	35	180	90	0,75
Marnes et argiles (couche 5.2)	22,5	2000	6	500	35	300	150	0,75

**Tableau III**  
**Caractéristiques géotechniques**  
**Geotechnical characteristics**

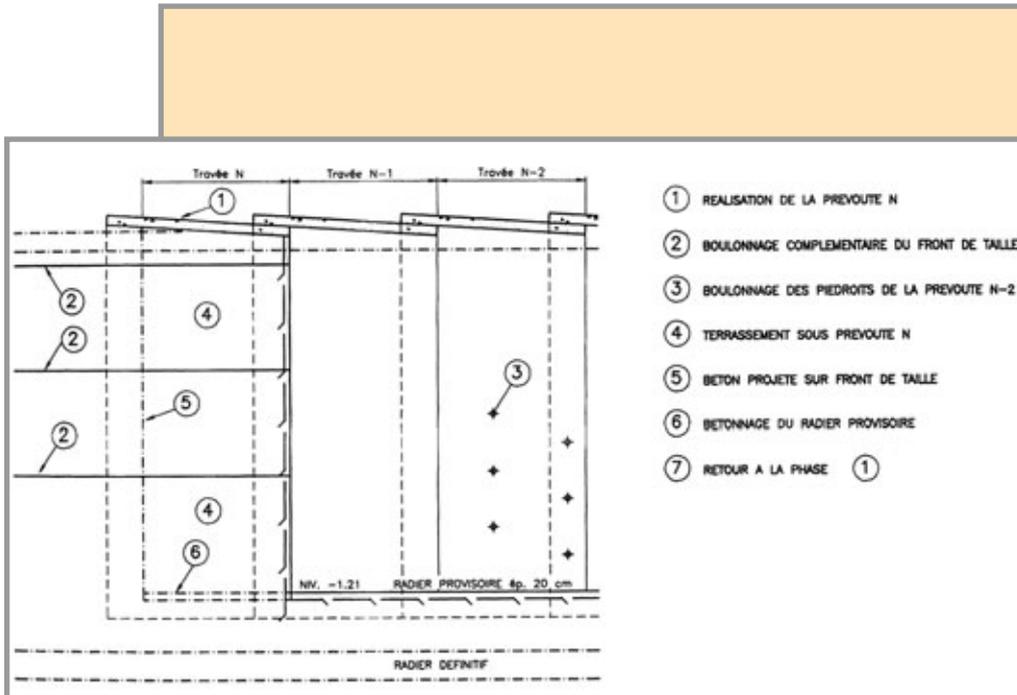
-  $\gamma$  : poids volumique apparent ;  $c_u$  : cohésion non drainée ;  $\phi_u$  : angle de frottement non drainé ;  $c'$  : cohésion drainée ;  $\phi'$  : angle de frottement interne drainé ;  $E_j$  : module d'Young à court terme ;  $E_\infty$  : module d'Young à long terme ;  $K_0$  : coefficient de poussée des terres au repos

	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_u$ (kPa)	$\phi_u$ (°)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$E_j$ (MPa)	$E_\infty$ (MPa)	$K_0$
Calcaire inférieur (couche 3)	21,5	250	35	100	45	240	160	0,40
Marnes et marnes calcaires (couche 4)	21,4	185 à 200	6	50	35	120 à 150	60 à 75	0,75
Marnes et argiles (couche 5.1)	21,9	185 à 200	6	50	35	120 à 150	60 à 75	0,75

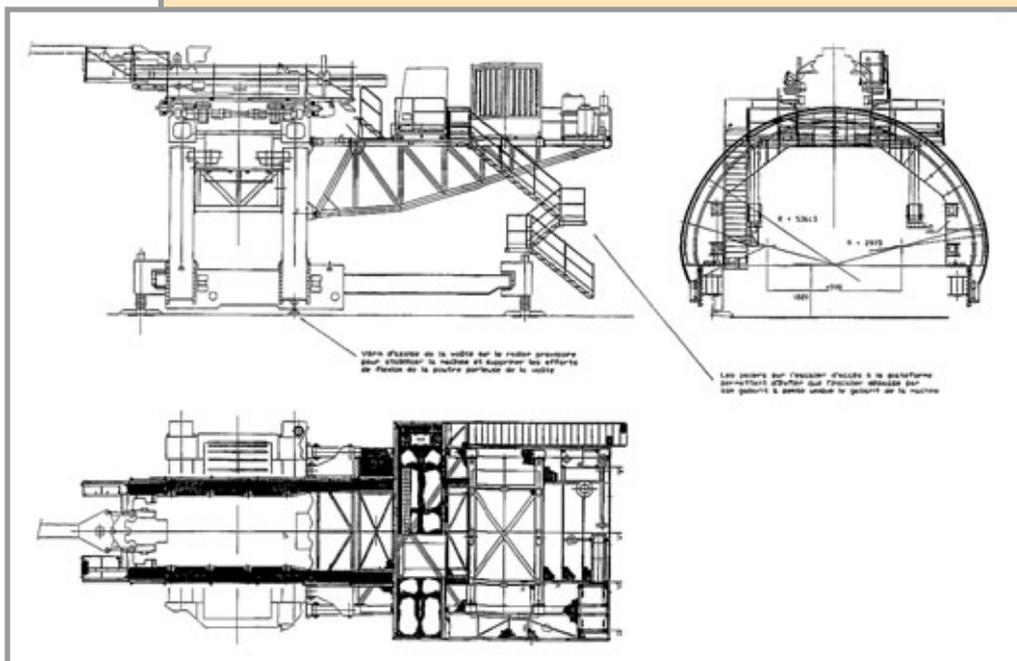
**Tableau IV**  
**Caractéristiques géotechniques retenues pour les têtes**  
**Geotechnical characteristics adopted for the heads**

	Couche 4	Couche 5
Fraction argileuse (< 80 $\mu$ )		20 % à 50 %
Consistance		30 % < WL < 60 % 10% < IP < 30%
Teneur en eau	20% < w < 30%	12% < w < 16%
Résistance en compression simple	0,6 < $\sigma_c$ < 2,0 MPa	0,15 < $\sigma_c$ < 2,4 MPa
Essais de gonflement		0,32 < Pg < 0,65 MPa
Dureté abrasivité		très peu abrasif
Module pressiométrique	Valeurs dispersées $E_M > 200$ MPa ou $30 < E_M < 50$ MPa	80 < $E_M$ < 200 MPa 40 < $E_M$ < 80 MPa pour les niveaux sableux
Pression limite	Valeurs dispersées $p_l > 12,0$ MPa ou $4,0 < p_l < 8,0$ MPa	12,0 < $p_l$ < 13,0 MPa 3,5 < $p_l$ < 8,0 MPa pour les niveaux sableux
Vitesse microsismique	1900 m/s à 2150 m/s	1900 m/s à 2000 m/s

**Tableau V**  
**Caractéristiques géotechniques des couches traversées par les tubes**  
**Geotechnical characteristics of the layers crossed by the tubes**



**Figure 4**  
**Cycle**  
**d'excavation**  
**Excavation**  
**cycle**



**Figure 5**  
**Machine**  
**de prédécoupage**  
**Presplitting**  
**machine**

- ◆ déversement, après regards siphoniques coupe-feu dans un bassin de rétention qui permettra également de récupérer les eaux de lavage ;
- ◆ captage des eaux claires situées à la base de l'étanchéité par un réseau séparatif dont l'exutoire est directement le milieu naturel.

## Chaussées

La chaussée a été dimensionnée en fonction de la chaussée de la section courante et est composée de :

- ◆ 0,07 m de béton bitumineux ;
- ◆ 0,11 m de grave bitume de base ;
- ◆ 0,12 m de grave bitume de fondation ;
- ◆ 0,17 m de 0/20 ;
- ◆ 0,35 m de 0/150.

## Equipements d'exploitation

Compte tenu de la faible longueur de l'ouvrage, il n'y a pas de ventilation mécanique. Le tunnel sera autorisé au transit des matières dangereuses. Il est équipé de plots de balisage, d'un réseau d'appel d'urgence et de feux d'affectations des voies.

## ■ MÉTHODOLOGIE DE CREUSEMENT

### Méthode retenue

Le dossier d'appel d'offres prévoyait l'excavation des tunnels en section divisée avec cintres et béton projeté mais avec possibilité de variante d'exécution.

Le groupement Perforex - Chagnaud a présenté une variante en prédécoupage mécanique avec prévoûtes en pleine section dite méthode Perforex, seules les attaques côté nord étant réalisées avec la méthode d'origine sur une courte longueur (≈ 20 m). Cette solution variante, déjà utilisée sur de nombreux chantiers en France et à l'étranger, a fait ces dernières années l'objet de perfectionnements dans le cadre de l'important programme de recherche Premec piloté par Perforex, programme qui a bénéficié du label européen Eureka.

Rappelons que la méthode par prédécoupage mécanique a pour avantages :

- ◆ de limiter la décompression du terrain et ainsi de réduire au minimum les tassements dans le tunnel et en surface ;
- ◆ de disposer d'un présoutènement permettant ainsi d'améliorer les conditions de travail à front et donc la sécurité ;
- ◆ d'éviter la phase demi-section inférieure génératrice de redémarrage des convergences et tassements.

Comme c'est souvent le cas, la méthode présentait également pour les tunnels de Pech Brunet,

l'avantage d'être plus économique que la solution d'origine. Sensible à ces avantages, le maître d'ouvrage a décidé de retenir cette solution.

### Principales caractéristiques

Compte tenu des conditions géologiques et géométriques du site, les principales caractéristiques qui avaient été retenues à l'origine, étaient les suivantes (figure 4).

#### Prévoûte

Elle est réalisée sur une longueur de 5 ml et une épaisseur de 25 cm par 12 à 16 tronçons répartis sur la périphérie qui sont découpés et remplis avec du béton projeté par voie sèche (résistance à la compression de 8 MPa à 4 heures). La machine de prédécoupage d'une masse de 160 t est représentée sur la figure 5 et la photo 4.

#### Boulonnage du front

Des boulons tubulaires en fibres de verre de 18 ml et de diamètres 40/60 mm sont scellés au coulis de ciment. Leur densité est de 1 pour 2 m<sup>2</sup> de front soit une soixantaine dont une quinzaine est renouvelée à chaque cycle.

#### Boulonnage radial

Des boulons métalliques (diamètre 25 mm longueur 4 ml) scellés au coulis de ciment sont mis en place dans les piédroits et les reins des prévoûtes (4 unités par prévoûte de chaque côté forés en dehors du cycle d'avancement).

#### Terrassement

Les passes d'avancement sont de 4 ml pouvant exceptionnellement être réduites à 3,5 ml ou 3 ml. Le terrassement est réalisé à l'aide d'une pelle type Liebherr de 48 t. Un engin sur pneus Caterpillar charge des dumpers type Volvo A25. Juste à la suite, un béton fibré est projeté par voie humide sur 5 cm d'épaisseur de façon à mettre en sécurité le front.

#### Radier de roulement

Deux plots préfabriqués en béton sont posés à front, ensuite un radier de 20 cm d'épaisseur est réalisé tout autour. Ces plots serviront d'appui pour les pieds de la haveuse.

## ■ VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT RETENU

Le dimensionnement de l'ouvrage, étudié aux éléments finis à l'aide du programme César-LCPC, a compris :

- ◆ une étude détaillée réalisée par le maître d'œuvre pour définir la solution de base de l'Avant-projet d'ouvrage d'art (APOA);



Photo 4  
Tube Est  
en cours  
d'excavation  
  
East tube  
during  
excavation

- ◆ un prédimensionnement de la variante prévoûte (au stade l'offre);
- ◆ une étude préliminaire de sensibilité aux paramètres réalisée sur un modèle simplifié;
- ◆ une étude complète modélisant l'ensemble des deux tubes;
- ◆ l'élément déterminant de l'étude des structures définitives a été la prise en compte d'éventuelles pressions de gonflement en radier.

### Etude préliminaire de sensibilité

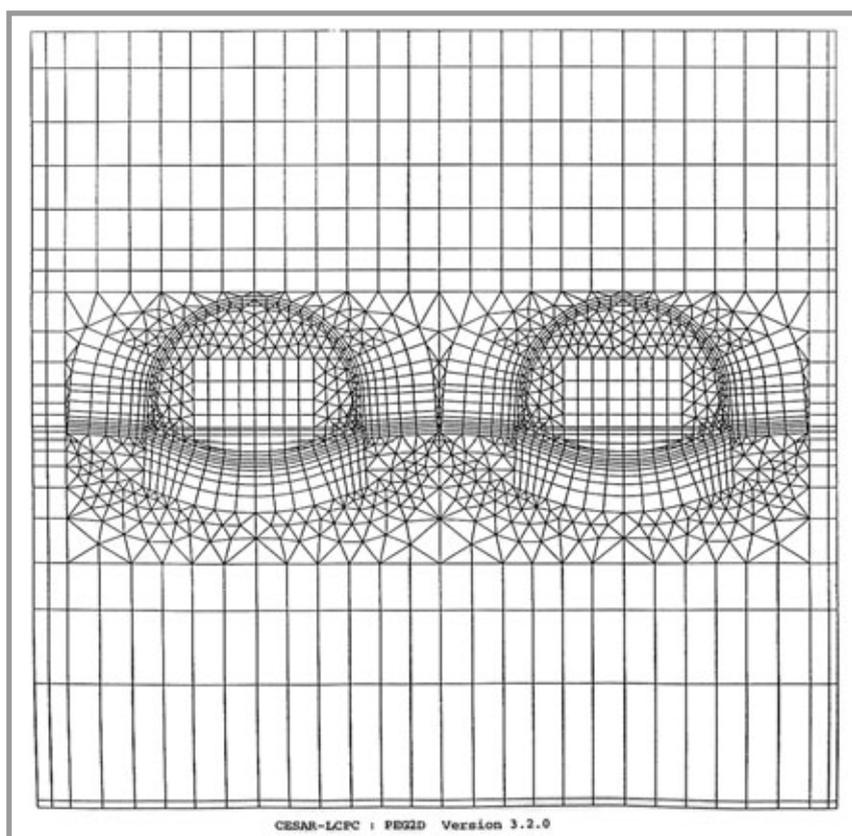
Cette étude a été réalisée avec un demi-modèle (tunnel isolé) dans le but d'effectuer des calculs de sensibilité. Les points concernés par ces calculs et leurs résultats sont les suivants :

- ◆ influence de la longueur de recouvrement entre deux prévoûtes : avec un recouvrement de 2 m les prévoûtes ne sont que légèrement moins sollicitées qu'avec un recouvrement de 1 m;
- ◆ influence des conditions de liaison entre le radier provisoire de roulement et la prévoûte : encastrement parfait, rotule glissante et liaison du type glissant. Cette dernière condition s'est avérée la plus appropriée;
- ◆ influence du boulonnage en piédroit : la présence des boulons permet de diminuer de l'ordre de 30 % les contraintes de traction sollicitant l'intrados des piédroits;
- ◆ influence d'une redistribution des contraintes (fluage partiel appliqué avant la mise en place du revêtement définitif);
- ◆ plusieurs hypothèses ont été considérées pour déterminer le jeu de paramètres le plus défavorable : module de déformation moyen pour les terrains et module à court terme pour le béton de prévoûte ; le choix des caractéristiques de résistance des terrains à court ou à long terme ( $c$  et  $\phi$  ou  $c'$  et  $\phi'$ ) est ici pratiquement sans influence sur les résultats.



### Etude complète - Présoutènement

La section de calcul (modèle bidimensionnel) a été placée dans la zone où la hauteur de la couverture atteint sa valeur maximale égale à 21 m. Les deux tubes ont été modélisés afin de prendre en compte l'interaction entre eux (figure 6). L'influence de l'excavation d'un tube sur l'environnement de l'autre doit être prise en compte du fait de la faible épaisseur du pilier de terre restant entre les deux évidements. Cette épaisseur, égale à 11,00 m environ, représente 0,70 fois le diamètre du tube alors qu'une distance au moins égale à deux fois ce diamètre est généralement nécessaire pour qu'on puisse négliger l'interaction réciproque entre deux tunnels voisins.



**Figure 6**  
**Modèle pour calculs**  
**aux éléments finis**  
*Model for finite-element*  
*calculations*

L'étude du modèle complet a nécessité 13 phases de calculs tenant compte de toutes les phases d'exécution de l'ouvrage qui se résument par les étapes suivantes :

- ◆ réalisation des prévoûtes et excavation pleine section du tunnel ouest puis bétonnage de son radier définitif;
- ◆ prise en compte d'un fluage partiel des terrains à moyen terme, qui se traduit par un chargement supplémentaire des prévoûtes du premier tube pendant l'excavation du second;
- ◆ excavation du tunnel est;
- ◆ bétonnage du tunnel ouest puis du tunnel est;
- ◆ passage aux caractéristiques des terrains à long terme et application d'une pression de gonflement sur la sous-face du radier.

Les principaux résultats obtenus pour les structures provisoires du modèle complet sont les suivants :

- ◆ suite à la réalisation du radier définitif du premier tube (tube ouest) l'excavation du second tube (tube est) tend à faire diminuer les contraintes de traction dans les prévoûtes du premier;
- ◆ l'accumulation des contraintes dans le sol et les reports de charges intervenus au cours de l'excavation du premier tube entraînent des sollicitations dans les prévoûtes du second nettement supérieures à celle du premier. Il apparaît de plus une certaine dissymétrie dans la répartition des sollicitations : le piédroit le plus sollicité étant celui le plus proche du tube déjà excavé;
- ◆ dans toutes les phases de calculs, la voûte de la prévoûte reste entièrement comprimée avec des valeurs de compression inférieures au seuil admissible;
- ◆ quant aux piédroits, ils demeurent tendus sur la face intrados (- 2 à - 3 MPa) et comprimés sur la face extrados (12 à 14 MPa); mais l'ensemble de ces sollicitations reste dans le domaine admissible du béton non armé.

### Etude complète - Structures définitives

L'étude des structures définitives devait prendre en compte le gonflement de la couche des argiles et marnes des molasses de l'Agenais susceptible de solliciter la sous-face du radier. Plusieurs approches ont été développées dans le but de cerner au mieux la valeur et le mode d'application de la pression de gonflement. L'approche finalement retenue permettait de rester sécuritaire par rapport à un phénomène difficilement quantifiable tout en essayant de ne pas le surestimer exagérément. Les calculs aux éléments finis ont été effectués en modélisant le gonflement sous la forme d'une pression extérieure appliquée sur les nœuds du radier compte tenu de la présence d'éléments de contact entre le radier et le terrain sous-jacent. Le comportement retenu pour ces éléments est du type adhérence parfaite (lorsque les deux matériaux sont en contact) avec une résistance en traction nulle autorisant le décollement du radier par rapport au terrain.

Deux types de diagramme de pression ont été considérés successivement :

- ◆ diagramme de pression uniforme de 250 kPa sur l'ensemble du radier (cas déterminant pour le ferrailage à l'encastrement radier/piédroits);
- ◆ diagramme de pression triangulaire d'intensité nulle sous les piédroits et maximale, 300 kPa, en clé de radier (cas déterminant pour le ferrailage au milieu du radier).

Les résultats des calculs ont conduit au revêtement définitif suivant : voûte épaisseur 50 cm en béton B 25 non armé et radier incurvé épaisseur 60 cm

en béton B 35 armé avec une densité de ferraille de 130 kg/m<sup>3</sup>.

## ■ PROBLÈMES RENCONTRÉS - MESURES PRISES

Des problèmes sont très rapidement apparus lors des premières attaques :

- ◆ mouvement d'ensemble du massif en tête S.-O. (tête d'attaque en prédécoupage) provoquant une fissuration des talus ;
- ◆ fissuration des premières prévoûtes ;
- ◆ mouvements importants en tête N.-O. au voisinage de la partie réalisée en traditionnel, provoquant des tassements très importants (plus de 5 cm) et un déplacement de la berlinoise ancrée préalablement réalisée ;
- ◆ enfin une instabilité des sols liée à une poche de sable bouillant a affecté les vingt premiers mètres de la tête S.-E.

Les mesures prises ont été les suivantes :

### Tête sud-ouest

Lors du démarrage des premières prévoûtes, des fissures apparurent dans la coque de béton projeté des talus extérieurs et ceci presque immédiatement après le terrassement. A l'extérieur du tunnel, un renforcement du béton projeté et du boulonnage du talus ouest a dû être mis en œuvre.

### Tunnel en section courante

Les fissures dans les prévoûtes apparaissant toujours en premier lieu sur le parement ouest, d'une façon transversale, on pouvait imaginer qu'il se produisait très rapidement un chargement dissymétrique du soutènement. Cette hypothèse se confirma lorsque le maître d'œuvre installa un matériel d'auscultation permanente des contraintes et des déformations de terrain et du béton de prévoûte.

A l'intérieur du tunnel, les mesures de renforcement du soutènement furent principalement une augmentation du nombre et de longueur des boulons radiaux qui durent être réalisés sur la dernière prévoûte donc dans le cycle (6 à 8 boulons de 5,50 ml par piédroit).

### Tête nord-ouest

A la tête N.-O. le terrassement a été réalisé en traditionnel sur une longueur de 22,50 m (section divisée, soutènement par cintres lourds tous les 1,00 m, béton projeté sur treillis soudé). Des tassements importants (+ de 5 cm en surface) et des mouvements dans la berlinoise latérale (ancrée au moyen de tirants) ont conduit à renforcer l'assise du soutènement de demi-section supérieure. Il fut procédé à la réalisation de micropieux (Ø 150, L

= 12,00 m) à travers les longrines d'appuis des cintres. Cette disposition stoppa le mouvement et permis d'entreprendre le terrassement de la demi-section inférieure par passe restreinte (1,20 m maxi) sans engendrer d'autres mouvements.

Ce renforcement très important du soutènement et cette modification du phasage entraînent, sur cette seule opération, un délai supplémentaire de travaux de 1 mois.

### Tête sud-est

Enfin, la troisième difficulté liée au terrain fut l'instabilité des 20 premiers mètres de l'attaque sud-est où des alternances de poches de sable et la présence de très nombreux plans de glissement et d'eau ralentirent considérablement la progression des équipes.

Dès le marinage, sous la première prévoûte, le terrassement a dû être réalisé en section divisée de façon à limiter la surface de terrain non soutenue par le béton projeté. L'eau de forage des boulons de front ainsi que celle des boulons radiaux fut bannie. Les forages furent réalisés à sec et les scellements à l'aide de mousse spéciale. Ces choix difficiles et coûteux permirent de ne pas accroître les difficultés qui auraient pu devenir insurmontables sur une telle section (hauteur en clé 10,00 m, largeur aux reins 15,00 m).

## ■ SUIVI DU COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE

La sensibilité du site a conduit les différents intervenants à mettre au point un important système de suivi du comportement de l'ouvrage et de son environnement.

### Contrôle interne - Contrôle externe

Ces contrôles ont pour but de suivre en permanence la qualité des travaux réalisés en regard des contraintes imposées contractuellement ou par les notes de calcul. L'expérience acquise sur les précédents chantiers avait conduit à définir dans le CCTP la section type des auréoles de contrôle (5 points, 6 cordes), leur nombre et la fréquence de leur mesure, la première mesure (point zéro) se faisant juste après le terrassement sur cibles posées à l'intrados de la prévoûte dégagée.

L'apparition d'un mouvement inexplicé dès la réalisation des premières prévoûtes du tube ouest a conduit à un renforcement des équipements et des mesures. En effet il fut décidé d'équiper le talon de chaque prévoûte encore dans le terrain de cibles, de faire la première mesure avant le terrassement et de renforcer la fréquence des mesures allant parfois jusqu'à une fréquence biquotidienne. Par

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### Maître d'ouvrage

Autoroutes du Sud de la France

### Maître d'œuvre général

Scetauroute direction Centre Sud-Ouest

### Maître d'œuvre particulier pour les ouvrages souterrains

Scetauroute direction des Tunnels et Travaux Souterrains

### Architectures des têtes de tunnel

Bardet, Richard, Soucheyre et associés

### Entreprises

Groupement d'entreprises Perforex - Chagnaud

### Travaux de terrassement et de confortement des têtes

Solétanche dans le cadre d'un marché spécifique

- **Montant des travaux de génie civil** : 82 millions de francs TTC pour un délai global de 17 mois (y compris la période de préparation)



la suite, le groupement d'entreprises Perforex - Chagnaud et son conseil Simecsol, le maître d'œuvre Scetauroute et le contrôle extérieur du maître d'ouvrage Bonnard et Gardel suivirent l'évolution de ces mesures en commun. Dans les zones où la stabilisation ne se fit pas rapidement, des mesures de soutènement complémentaires furent décidées, par renforcement du boulonnage en piédroits. Parallèlement au suivi des déformations, un contrôle systématique de la résistance du béton fut établi à chaque prévoûte. Les carottes provenant de caisses d'échantillonnage étaient écrasées au laboratoire du chantier à 4 h d'âge. Si le critère de résistance à la compression de 8 MPa n'était pas atteint, le démarrage du terrassement était repoussé et de nouvelles carottes étaient écrasées jusqu'à obtention des 8 MPa. Enfin des carottes étaient réalisées en place toutes les cinq prévoûtes pour écrasement à 28 jours.

### Contrôle extérieur

Au-delà de ces contrôles, le maître d'ouvrage a prévu d'effectuer les suivis des comportements ci-après.

#### Tunnel SNCF

Dans le cadre d'une convention établie entre le maître d'ouvrage ASF et la SNCF, le tunnel ferroviaire a été équipé de 11 sections de mesures de convergence destinées à contrôler le comportement du tunnel ferroviaire durant les différentes phases de travaux.

La périodicité des mesures fixée par la convention dépendait de l'avancement des travaux.

Les seuils d'alerte étaient également fixés par la convention :

- ◆ resserrement de la fréquence des mesures en cas de déformations par rapport à la mesure zéro supérieures à 2 mm, soit 4 mm sur la longueur réelle des cordes ;
- ◆ visite quotidienne et décision d'action en cas de déformations par rapport à la mesure zéro supérieures à 4 mm, soit 8 mm sur la longueur réelle des cordes.

Le suivi réalisé conformément à la périodicité n'a jamais mis en évidence de dépassement des seuils d'alerte, ainsi l'amplitude des déplacements a été conforme à ce qui pouvait être anticipé à partir des calculs aux éléments finis effectués dès la phase d'avant-projet d'ouvrage d'art.

#### Suivi des têtes

Le suivi des têtes de tunnel et des confortements a été réalisé au moyen d'un contrôle topographique de cibles, de mesures inclinométriques, et d'un contrôle de la tension des tirants de la berlinoise de la tête nord. La fréquence de toutes ces mesures a été augmentée suite à l'apparition de mouvements en tunnel.

#### Ouvrages en souterrain

Les deux tubes ont été équipés chacun d'une section de mesure comportant :

- ◆ distofors à quatre capteurs de 12 m de long ;
- ◆ SC5N, extensomètres mis en œuvre à l'intrados des prévoûtes ;
- ◆ VBS, capteurs de mesures de contraintes dans les prévoûtes positionnés à l'intrados et à l'extrados des prévoûtes ;
- ◆ cellules de pression totale pour contrôler la pression de gonflement sous la contrevoûte ;
- ◆ C110, cordes vibrantes réparties respectivement en fibres tendue, neutre et comprimée du béton de revêtement et du béton de la contrevoûte.

#### Résultats des mesures

Les déformations des prévoûtes (convergence, tassement) mesurées sur le site se sont toujours révélées inférieures ou égales aux déformations obtenues par les calculs aux éléments finis :

- ◆ convergence horizontale calculée = 2 cm, mesurée ≈ 1,2 à 1,8 cm pour la plupart des prévoûtes et 2,2 à 2,5 cm pour quelques-unes (compte tenu du renforcement du boulonnage des piédroits mis en œuvre en cours de chantier) ;
- ◆ abaissement calculé de la clé de prévoûte = 1 cm, mesuré du même ordre ;
- ◆ tassement calculé des appuis de la prévoûte = 2 cm, mesuré du même ordre ;
- ◆ tassement en surface calculé = 3 cm, mesuré ≈ 1,5 cm maximum (entrée de tunnel).

L'interprétation de toutes ces mesures fera l'objet d'un article spécifique ultérieur.

## ■ BILAN DU CHANTIER

Toutes les mesures prises ont permis de rester dans la fourchette de déformation admissible, aussi bien dans le tunnel SNCF que dans les tubes nouvellement construits et de garantir la sécurité totale des ouvrages et des personnes.

Malgré la rencontre d'un terrain presque conforme à l'étude géologique et géotechnique, les difficultés rencontrées ont engendré un délai supplémentaire.

Le tunnel étant sur le chemin critique de la section Montauban - Cahors Sud, des mesures d'accélération ont été prises pour rentrer strictement dans le planning d'ensemble.

Un planning de rattrapage a donc été élaboré en mai 1997 inscrivant sur le chemin critique des travaux tous les ateliers.

En novembre 1997, on ne comptait pas moins de huit ateliers travaillant simultanément, la plupart à trois postes par jour et 6 jours par semaine. Ainsi, le premier tube a été livré le 19 janvier 1998 et le deuxième le 21 février 1998, conformément au nouveau planning établi ; le délai global étant ainsi de 16 mois.

## ■ CONCLUSION

Ce chantier présentait des caractéristiques favorables :

- ◆ une bonne étude géologique et géotechnique mettant en évidence un terrain bien adapté à la méthode retenue ;
- ◆ un planning réaliste sans être trop tendu ;
- ◆ quatre attaques possibles offrant la possibilité de réaliser des travaux en temps masqué.

Des mouvements d'ensemble du massif que l'étude géologique ne laissait pas prévoir, ont introduit des mouvements sur les têtes et des poussées dissymétriques sur l'ouvrage encore mal expliquées aujourd'hui.

Une très bonne collaboration entre maître d'œuvre, conseils, entreprises, ayant la confiance du maître d'ouvrage, a permis de résoudre rapidement et de manière adaptée tous les problèmes rencontrés.

A posteriori, le choix par le maître d'ouvrage, de la méthode par prédécoupage mécanique avec prévoûtes s'est révélé particulièrement judicieux pour surmonter ces problèmes.

## ENGLISH SUMMARY

### Motorway A 20 The Pech Brunet tunnel

*B. Mahieu, A. Antoine*

This tunnel, with two tubes of 246 m and 206 m, was built as a variant with a full section using the mechanical pre-splitting method with preliminary arches. The total excavated section of 155 sq. m constitutes an excavation record with the Perforex method. The ground encountered (clay, marl and molasses of the Stampian) was as predicted by the prior geological and geotechnical investigations. Overall movements of the rock formation during the excavation, the alternation of sand pockets, the presence of many slip planes and groundwater tables at the start of the eastern tube, as well as uneven loading of the supports in the middle sections, made it necessary to apply additional strengthening.

However, in general, perfect collaboration between the main contractor, consultants, contracting firms, trusted by the client, made it possible to overcome these problems and to meet the deadlines while complying with quality and safety requirements, confirming the right choice of the method.

## DEUTSCHES KURZREFERAT

### Die Autobahn A 20 Der Tunnel von Pech Brunet

*B. Mahieu, A. Antoine*

Dieser Tunnel mit zwei je 246 m und 206 m langen Röhren ist nach der Methode der mechanischen Vorarbeit mit vorläufigen Gewölben ausgeführt worden. Der ausgebagerte Gesamtquerschnitt von 155 m<sup>2</sup> stellt einen Rekord für die Perforex-Methode dar. Der Untergrund (Ton, Mergel und Molasse aus dem Oligozän) hat sich als mit der geologischen und geotechnischen Voruntersuchung übereinstimmend erwiesen. Aufgrund von Bewegungen der gesamten Formation während der anfänglichen Baggerarbeiten, der abwechselnden Sandtaschen, des Vorhandenseins zahlreicher Gleit- und Wasserflächen im ersten Abschnitt der östlichen Röhre und einer asymmetrischen Belastung der Stützmauer sind zusätzliche Entlastungsmaßnahmen getroffen worden. Global gesehen hat jedoch die perfekte Zusammenarbeit zwischen

Federführer, Consultants, Bauunternehmen, denen der Bauherr sein vollstes Vertrauen schenkte, die Bewältigung dieser Probleme unter Einhaltung der Termine, der Qualitäts- und Sicherheitsvorgaben erlaubt, was die methodologische Entscheidung nachträglich als richtig bestätigt.

## RESUMEN ESPAÑOL

### Autopista A 20 El túnel de Pech Brunet

*B. Mahieu y A. Antoine*

Este túnel, formado por dos tubos de 246 m y 206 m se ha ejecutado en variante plena sección en método de precorte mecánico con prebóvedas. La sección total excavada, de 155 m<sup>2</sup>, constituye un récord de excavación con el método Perforex. Los terrenos atravesados (arcillas, margas y molasas del Stampiano) se han llevado a cabo de conformidad con el estudio geológico y geotécnico preliminar. Diversos movimientos de conjunto del macizo al proceder a la excavación de las entradas, la alternancia de inclusiones de arena, la presencia de numerosos planos de deslizamiento y de agua al iniciar el tubo Este, así como una carga disimétrica del sostenimiento en sección corriente, precisaron tomar medidas de consolidación suplementarias.

Pero, en conjunto, la perfecta colaboración entre el responsable técnico, los consultores y las empresas constructoras, con la confianza de la entidad contratante, han permitido superar estos problemas respetando debidamente los plazos impartidos, la calidad y la seguridad, todo lo cual viene a confirmar a posteriori la opción adecuada del método aplicado.

# TGV Méditerranée

## Le tunnel de Bonpas

Le lot 2K - 2L du TGV Méditerranée comprend le tunnel de Bonpas et le viaduc de franchissement de l'autoroute A 7.

Ces ouvrages sont réalisés par le groupement GTM Construction - Fougère Ballot - Eiffel. Le tunnel long de 303 m a une section d'air de 100 m<sup>2</sup> fini. La longueur en souterrain est creusée en sections divisées.

Les excavations sont réalisées avec une pelle équipée d'une fraise de havage par passe de 1,75 m maximum en demi-section supérieure et 4,5 m en demi-section inférieure. Le soutènement est constitué de cintres métalliques lourds ou réticulés associés à du béton projeté fibré de 25 cm d'épaisseur. Le revêtement définitif en béton de 50 cm d'épaisseur est avancé par plots de 10 m. Les ouvrages à l'air libre ont fait l'objet d'une étude architecturale et paysagère (photo 1).

La ligne TGV qui prend son origine près de Valence emprunte la vallée du Rhône jusqu'à Avignon, puis se sépare vers Montpellier et Marseille.

Au sud d'Avignon et en direction de Marseille, le tracé longe la Durance sur sa rive droite. Dans le secteur de Bonpas, le tunnel traverse la montagne des plaines sur laquelle est située la chartreuse de Bonpas au XII<sup>e</sup> siècle (photo 2). La tête Est est un cadre voûté de 11 m de long; au-delà le radier est prolongé de 27 m avec des murs latéraux inclinés. Les cadres voûtés des têtes de tunnel seront remblayés et ensemenés.

### ■ UN TUNNEL INTÉGRÉ DANS LE SITE

Le viaduc qui précède le tunnel au nord est un ouvrage mixte de 356 m de long qui enjambe l'autoroute A 7 (figure 1). Le tunnel long de 303 m a une section d'air de 100 m<sup>2</sup> fini, ce qui correspond à un rayon en voûte de 6,30 m et en piédroit de 12,60 m (figure 2). La longueur en souterrain représente 254 m. L'entrée et la sortie de la colline ont fait l'objet d'une étude architecturale et pay-

sagère. La tête ouest est un cadre voûté de 38 m de long, essentiellement visible depuis l'autoroute; elle est parée de plusieurs murs, dont la hauteur peut atteindre 14 m au-dessus de la plateforme ferroviaire.

Cet aménagement paysager symbolise les remparts d'une forteresse rappelant ainsi le rôle de la chartreuse de Bonpas au XII<sup>e</sup> siècle (photo 2). La tête Est est un cadre voûté de 11 m de long; au-delà le radier est prolongé de 27 m avec des murs latéraux inclinés. Les cadres voûtés des têtes de tunnel seront remblayés et ensemenés.

Plusieurs campagnes de reconnaissances préalables (sondages carottés, sondages destructifs, essais pressiométriques, essais géotechniques...) ont permis d'obtenir des informations sur la nature des terrains.

Le creusement est principalement situé dans les marnes de Caumont sous une couverture variant de 10 à 43 m.

Ces formations sont de l'âge du Miocène et se caractérisent par des marnes jaunes en surface et gris-bleu dolomitiques à passage sableux au sein

Photo 1  
Vue d'ensemble  
viaduc  
et tunnel  
depuis l'ouest  
  
Overall view of viaduct  
and tunnel  
from the west



Figure 1  
Coupe longitudinale  
des ouvrages  
  
Longitudinal  
section of structures

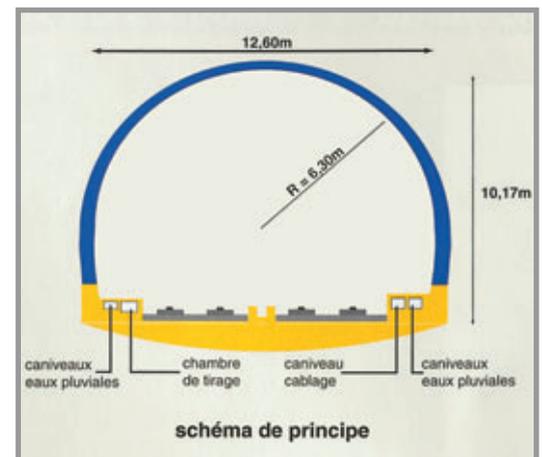
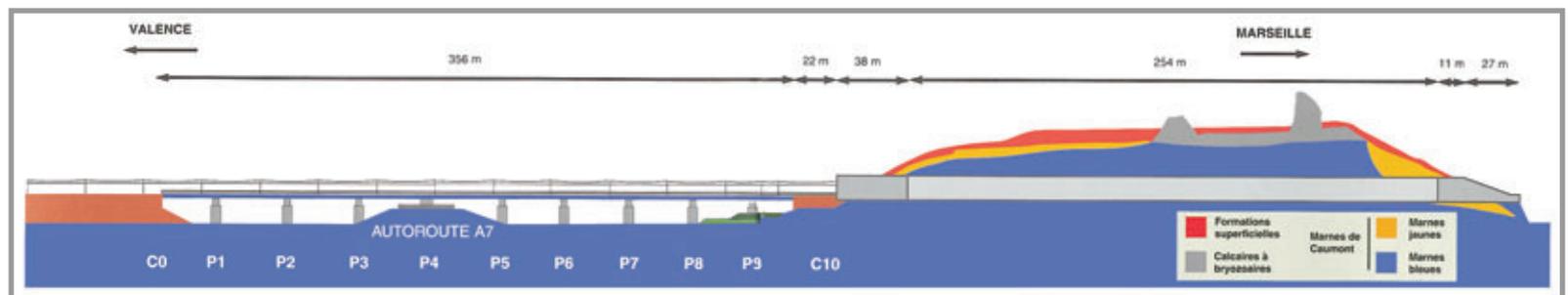


Figure 2  
Coupe transversale du tunnel  
  
Cross section of the tunnel





du massif. Il s'agit de matériaux homogènes, raides et peu fracturés; aucune présence d'eau n'était attendue, ce qui s'est confirmé par la suite.

## ■ UN CREUSEMENT EN SECTION DIVISÉE

Les terrassements des tranchées nécessaires à la réalisation des ouvrages de tête, sont effectués à l'abri de parois clouées. Ils sont exécutés par passes de 1,5 m de hauteur, avec un soutènement constitué de boulons d'ancrage de longueur variable de 3 à 12 m et deux nappes de treillis soudés associées à 15 cm de béton projeté. Ces terrassements à l'air libre permettent de démarrer le creusement en souterrain avec une couverture minimale de 8 m. A chaque entrée, une voûte parapluie constituée de 27 tubes injectés de 20 à 23 m de long est mise en œuvre à la périphérie de la ligne d'excavation. Le tympan d'entrée en souterrain est consolidé par des boulons d'ancrages en fibre de verre de 6 m de long (photo 3).

La section totale excavée en souterrain de 145 m<sup>2</sup> environ est creusée en sections divisées (demi-section supérieure puis demi-section inférieure). Les études d'exécution ont permis de concevoir deux profils type d'excavation. Un profil sous voûte parapluie de 20 à 23 m de long à partir de chaque tête. Les passes d'excavation sont de 1,5 m et le soutènement provisoire est constitué de cintres HEB 180, espacés de 1,5 m associés à 25 cm de béton projeté fibré et des boulons d'ancrage de 4 m de long en pied des oreilles du cintre.

Sur le reste du tunnel, on détermine un profil d'excavation par passe de 1,75 m et un soutènement provisoire constitué de cintres réticulés espacés de 1,75 m, associés à 25 cm de béton projeté fibré; le boulonnage rayonnant de 4 m de long n'est pas systématique (photo 4). En demi-section inférieure les passes d'excavation sont étendues à 4,5 m avec une continuité du soutènement de la demi-section supérieure. Un radier contrevoûté prévu systématiquement en fin de semaine pour la section supérieure, a été rapidement supprimé compte tenu de la qualité des marnes; par contre en demi-section inférieure il a été réalisé sur toute la longueur.

Les campagnes de reconnaissances à l'avancement par sondages destructifs et/ou carottés, sont réalisés avant excavation sur des longueurs de l'ordre de 40 m. Une campagne de mesures microgravimétriques en demi-section inférieure a été



**Photo 2**  
 Aménagement  
 paysager  
 de l'entrée ouest  
*West entrance  
 landscaping*



**Photo 3**  
 Vue aérienne  
 de l'entrée  
 en souterrain  
*Aerial view  
 of entrance  
 underground*



**Photo 4**  
 Demi-section  
 supérieure  
*Upper  
 half-section*

ajoutée afin de s'enquérir de la présence éventuelle de cavités.

La section à excaver est abattue à l'aide d'une tête hydraulique de havage transversal, d'une puissance de 117 kW montée sur une pelle de 30 t. Une pelle équipée d'un brise-roches a permis de pas-

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### **Maitre d'ouvrage**

SNCF - Direction de la ligne nouvelle du TGV Méditerranée

### **Maitre d'œuvre**

SNCF - Division territoriale du Vaucluse et du Gard

### **Entreprises**

- GTM Construction direction France Sud (mandataire)
- Fougerolle Ballot
- Eiffel (charpente métallique du viaduc)

### **SOUS-TRAITANTS ET FOURNISSEURS**

#### **Terrassements extérieurs**

Midi Travaux

#### **Parois clouées**

Forézienne d'Entreprise

#### **Étanchéité**

Etandex

#### **Sondages**

EDG

#### **Auscultations**

Cabinet Veillard

#### **Contrôle des bétons**

CEBTP

#### **Armatures HA**

Pose armatures Mure

#### **Bétons**

Béton de France

#### **Soutènements**

- Arcane
- Appro Service
- Atlas Copco

#### **Coffrages**

Asloc

**Photo 5**  
**Revêtement**  
**définitif du tunnel**  
**plot 1**

**Final lining**  
**of tunnel**  
**section 1**



ser les points durs. Le marinage des excavations est assuré par des charges et rouleaux de capacité 6 et 8 m<sup>3</sup> au godet, jusqu'au stock tampon extérieur au tunnel. Compte tenu de la taille de la section à soutenir (en demi-section inférieure, la hauteur à la clé représente un immeuble de quatre étages) le choix s'est porté sur du matériel important permettant de compléter un soutènement à tout moment si nécessaire. Le matériel principal provenant des entreprises du groupement est constitué :

- ◆ d'un érecteur de cintres ;
- ◆ d'un robot à béton projeté ;
- ◆ d'un boulonneur deux bras et d'une nacelle élévatrice.

Le béton projeté est livré prêt à l'emploi depuis une centrale existante. Les bétons destinés au soutènement de nuit sont stabilisés pour être utilisés dans le cycle normal de creusement. La stabilité de la section est vérifiée quotidiennement par des mesures de convergences et de nivellements selon la méthode de visée optique ; chaque auréole comprend cinq cibles au total.

## ■ PERCEMENT LE 2 SEPTEMBRE 1997

Le creusement de la demi-section supérieure a commencé au mois de mars 1997 par la tête ouest du tunnel sur une longueur de 230 m. Ensuite la demi-section inférieure a été réalisée sur 135 m, jusqu'au moment où il a été possible de démarrer l'amorce à l'est du tunnel, pour permettre le percement en demi-section supérieure le 2 septembre 1997. Le solde du creusement de la demi-section inférieure a été réalisé depuis la tête Est. Le creusement en souterrain a fonctionné à trois postes par jour et cinq jours par semaine avec un effectif moyen de 25 personnes y compris les servitudes.

Les cadences moyennes sont de 16 m par semaine en demi-section supérieure et 29 m par semaine en demi-section inférieure.

Les revêtements définitifs sont constitués d'un radier armé réalisé par plots de 20 m de long. Des banquettes armées formant l'assise des caniveaux et l'amorce de la voûte sont réalisées par plots de 10 m de long.

La voûte et les piédroits d'une épaisseur de 50 cm de béton sont réalisés par plots de 10 m de long. L'outil est un coffrage en tôle métallique de 8 mm d'épaisseur stabilisé en pied par des ancrages noyés dans les banquettes ; l'ensemble repose sur un portique de manutentions équipé d'une centrale hydraulique permettant toutes les manœuvres de décoffrage. Le chantier fonctionne à deux postes : on peut ainsi réaliser une moyenne de 30 m de tunnel en revêtement définitif par semaine. Seuls les ouvrages extérieurs qui nécessitent un ferrailage de l'anneau et un coffrage de l'extrados, avancent à une cadence moyenne de 1 plot de 10 m par semaine. L'ouvrage reçoit une étanchéité en souterrain en voûte et piédroit sur 50 m à partir de chaque extrémité (photo 5).

## ■ RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT

Outre les études paysagères permettant l'intégration du projet dans le site, des contraintes environnementales liées à la présence de la chartreuse, nous ont conduits à prendre des mesures spécifiques dans le cadre du plan d'assurance environnement. Les itinéraires du chantier permettent d'éviter le passage devant les riverains ; nous avons utilisé du matériel insonorisé : pour les travaux d'aérage du tunnel en particulier, l'utilisation d'un dépoussiéreur en tunnel a permis de minimiser les

émanations de poussières issues de l'abattage, les terrassements d'entrée en tunnel sont limités pour respecter la végétation existante... En outre, le choix des coloris a été effectué sous contrôle de l'architecte des Bâtiments de France.

Le viaduc et le tunnel de Bonpas représentent un montant de 108 millions de francs, dont 40 % pour le tunnel et 7 % pour les aménagements paysagers. Le tunnel de Bonpas est terminé depuis le mois de mars 1998. Il reste à mettre en place la superstructure ferroviaire, pour permettre au TGV de circuler dans le tunnel où sa vitesse pourra atteindre 300 km/h, sous la protection de la Sainte-Barbe située à l'entrée du tunnel côté Avignon.

### LES PRINCIPAUX MATÉRIELS

- Pelle Caterpillar 325 L + fraise MT 1 000
- Pelle Caterpillar 325 L + BRH Indeco
- Nacelle érecteur de cintres Normet
- Robot à béton projeté Normet
- Boulonneur 2 bras Montabert
- Charges et roule (6 et 8 m<sup>3</sup>) Wagner
- Dépoussiéreur DHB 15 m<sup>3</sup>/s
- Ventilateur 45 m<sup>3</sup>/s
- Compresseur 20 000 l
- Grue à tour H30/30 et grue mobile 85 t

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS (Tunnel et murs paysagers)

- Déblais air libre : 17 500 m<sup>3</sup>
- Déblais tunnel : 37 000 m<sup>3</sup>
- Bétons de revêtement : 12 000 m<sup>3</sup>
- Coffrages : 14 000 m<sup>2</sup>
- Armatures HA : 600 t
- Etanchéité : 3 000 m<sup>2</sup>

#### Soutènements tunnel

- cintres : 190 t
- boulons : 1 900 m
- béton projeté : 2 650 m<sup>3</sup>
- fibres métalliques : 80 t

#### Soutènements des têtes

- voûte parapluie : 1 161 m
- boulons : 6 700 m
- treillis soudés : 35 t
- béton projeté : 650 m<sup>3</sup>

### ENGLISH SUMMARY

#### A tunnel near the Bonpas Monastery

*O. Betoux*

Section 2K - 2L of the TGV Mediterranean project includes the Bonpas tunnel and the viaduct crossing the A 7 motorway. These structures are being built by the consortium made up of GTM Construction, Fougerolle Ballot and Eiffel. The 303 m long tunnel has an air section of 100 sq. m finished. The underground length is excavated in divided sections. Excavations are carried out with a shovel equipped with a holing cutter working in passes of 1,75 m maximum on the upper half-section and 4,5 m on the lower half-section. Support is provided by heavy or cross-linked steel arches associated with 25 cm thick fiberised shotcrete. The 50 cm thick final concrete lining is advanced in units of 10 m. Special architectural and landscaping designs were provided for structures in the open air.

### DEUTSCHES KURZREFERAT

#### Ein Tunnel in der Nähe des Karthäuserklosters Bonpas

*O. Betoux*

Im Baulos 2K - 2L der Hochgeschwindigkeitsstrecke TGV Mittelmeer sind der Tunnel bei Bonpas und die Hochbrücke über die Autobahn A7 enthalten. Diese Bauwerke werden von einer aus GTM Construction, Fougerolle Ballot und Eiffel zusammengesetzten Arbeitsgemeinschaft ausgeführt. Der 303 m lange Tunnel hat einen Querschnitt von 100 m<sup>2</sup>. Der unterirdische Teil wird in getrennten Abschnitten gebohrt. Die Ausbaggerung erfolgte mit einem Schrämbagger in Schritten von maximal 1,75 m im Überkopfbereich und von maximal 4,5 m im unteren Bereich. Die Entlastung besteht aus massiven oder vernetzten Metallbögen mit 25 cm dickem Spritzbeton. Die 50 cm dicke abschließende Deckschicht wird in Abschnitten von 10 m aufgebracht. Die von außen sichtbaren Bauwerke waren Gegenstand einer architektonischen und landschaftsgestalterischen Studie.

### RESUMEN ESPAÑOL

#### Un túnel en las cercanías de la cartuja de Bonpas

*O. Betoux*

El lote 2K- 2L del tren de alta velocidad "TGV Mediterráneo", incluye el túnel de Bonpas y el viaducto de franqueo de la autopista A 7. Estas obras se han llevado a cabo por el Grupo GTM Construction - Fougerolle Ballot - Eiffel. El túnel, de una longitud de 303 m presenta una sección total de 100 m<sup>2</sup>. La longitud que se desarrolla en subterráneo se ha excavado en secciones separadas. Las excavaciones se han efectuado por medio de una pala equipada con una fresa de corte por pasadas de 1,75 m como máximo, en semi-sección superior y 4,5 m en semi-sección inferior. El sostenimiento está formado por cimbras metálicas pesadas o reticuladas en combinación con hormigón proyectado con integración de fibras, de un espesor de 25 cm. El revestimiento definitivo de hormigón de 50 cm de espesor, se aplica por tramos de 10 m. Las estructuras al aire libre han sido objeto de un estudio arquitectónico y del paisaje.

# Le métro de Lisbonne

## Construction du tronçon

### Une nouvelle ligne pour desservir

La ligne D du Métro de Lisbonne reliant le réseau existant (station Alameda) à la station Oriente située à l'entrée du parc Expo 98 est un des chantiers "phare" de l'exposition mondiale consacrée aux océans qui se déroule actuellement à Lisbonne et jusqu'au 29 septembre 1998. Sa réalisation, en particulier le tronçon Vale de Chelas/Oriente était complexe par ses différentes méthodes de construction, par ses contraintes existantes qu'il a fallu intégrer. C'était aussi un chantier aux délais très tendus : 3 ans et demi pour concevoir le projet et exécuter les travaux. C'était un challenge difficile pour l'ensemble des intervenants.

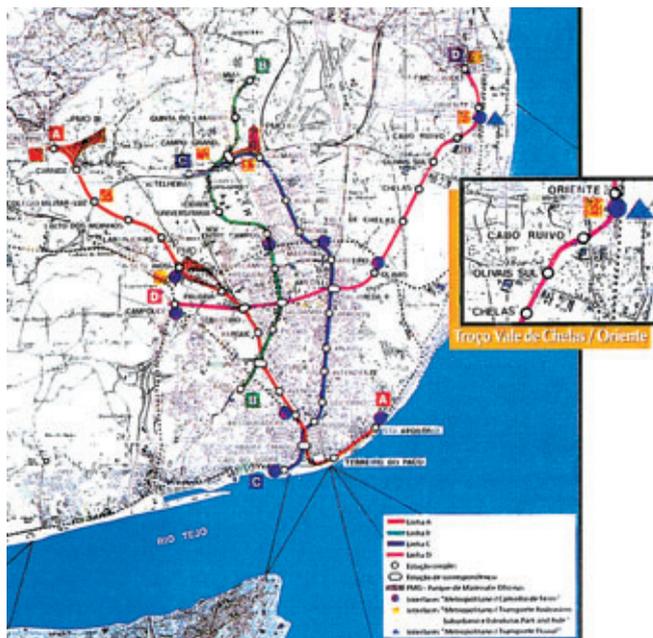


Figure 1  
Plan d'expansion  
du réseau du métro  
de Lisbonne (1993-1999)  
*Expansion Plan  
of Lisbon "métro"  
network (1993-1999)*

Dans le cadre du plan d'expansion du réseau de métro de la ville de Lisbonne, le Metropolitano de Lisboa a entrepris la construction d'une quatrième ligne (ligne D), pour relier le réseau existant aux quartiers nord-est, très peuplés et complètement rénovés dans la perspective de l'exposition mondiale.

gueur, quatre puits de ventilation, un poste de pompage et les puits de montage et de démontage du tunnelier.

Le délai global initial des travaux était de 33 mois (hors finitions) et la mise en vigueur du marché a été faite le 14 novembre 1994.

#### ■ LA STATION CHELAS

Située dans l'axe de l'avenue Augusto de Castro, la station s'étend entre deux rangées d'immeubles sur une longueur de 133 m et 22 m de largeur (hors accès) occupant ainsi la totalité de l'avenue (photo 1).

Le profil en long de la ligne, ainsi que le gabarit nécessaire au passage du tunnelier dans la station imposaient une excavation de 24 m de profondeur. Les immeubles de grande hauteur adjacents construits dans les années 1970 et dont les fondations étaient mal connues, ainsi que la présence d'une nappe phréatique, ont conduit à la réalisation de cette excavation dans une enceinte étanche et limitant au maximum la décompression des terrains limitrophes.

La solution d'une enceinte en paroi moulée de 1,00 m d'épaisseur, maintenue durant la phase d'excavation par trois niveaux de butons reprenant de 120 t à 200 t, a donc été retenue.

Après avoir effectué les nécessaires déviations de circulation et de réseaux, l'objectif était de réaliser rapidement cette enceinte ainsi que l'excavation et la dalle de fond, afin de permettre le passage du tunnelier dans la station.

Les structures intérieures : poteaux d'appuis de la dalle de couverture, locaux techniques, quais, atrium, ainsi que la dalle de couverture, ont été ensuite réalisées de manière traditionnelle.

La station se prolonge par une galerie de 128 m de long et de largeur variable de 15 à 26 m construite en tranchée couverte entre deux rangées de parois moulées de 1,00 m d'épaisseur et ancrées par des tirants actifs de 60 à 140 t.

Cette galerie s'élargit afin de libérer, en supplément des deux voies du métro, le gabarit d'une voie de garage qui se termine dans un tunnel traditionnel de 70 m<sup>2</sup> de section et de 70 m de long.

Les travaux ont débuté en avril 1995 permettant le passage du tunnelier dans la station et la section en tranchée couverte en septembre 1996 (photo 2). Les structures intérieures ont été terminées en mai 1997 permettant le démarrage des travaux de finitions et la livraison de la station en mai 1998.

La nouvelle ligne D baptisée Oriente a une longueur totale de 5 790 m et comporte sept stations. La ligne est reliée au réseau existant à la station Alameda et se termine à la station Oriente, la station intermodale (métro, bus et train) située à l'entrée du parc de l'Expo 98 (figure 1).

Le Metropolitano de Lisboa a découpé la ligne en quatre lots et a lancé fin 1993 des appels d'offres pour la conception (génie civil et électromécanique) et la construction (génie civil et finitions) de chacun des lots.

Dans le cadre de ces appels d'offres, le groupe Metrexpo, constitué des entreprises Spie Batignolles (pilote du groupement), Fomento de Construcciones Y Contratas, Cobetar, Somec et A. Veiga, a signé avec le Metropolitano de Lisboa un contrat pour la conception et la construction du lot Vale de Chelas/Oriente.

Ce tronçon d'une longueur totale de 2 777 m comprend 2 094 m de tunnel de diamètre intérieur 8,80 m, réalisé au tunnelier, trois stations de longueur respective 133 m (station Chelas), 155 m (station Olivais Sul) et 185 m (station Cabo Ruivo), une section en tranchée couverte de 128 m de lon-

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### Maitre d'ouvrage

Metropolitano de Lisboa

##### Maitre d'œuvre

Ensitrans

##### Entrepreneur

Groupement Metrexpo comprenant :

- Spie Batignolles (chef du groupement)
- FCC (entreprise espagnole)
- Cobetar (entreprise portugaise)
- Somec (entreprise portugaise)
- A. Veiga (entreprise portugaise)

##### Bureaux d'études

- S.G.T.E.
- Hidrotecnica Portuguesa
- Profabril



# Vale de Chelas - Oriente

## L'Exposition mondiale

### ■ LA STATION OLIVAIS SUL

La station Olivais Sul est située au carrefour des avenues Cidade de Luanda et Cidade de Bissau. Compte tenu du profil en long de la ligne qui descend vers le Tage et la zone de l'Expo 98, les quais sont situés à 30 m sous le niveau de la chaussée. La situation a donc été conçue en deux parties, l'une en surface avec salle d'accueil et billetterie, commerces et divers locaux techniques, l'autre en profondeur avec quais, salles du personnel et locaux techniques. Les deux parties sont reliées entre elles par quatre galeries inclinées, équipées d'escaliers mécaniques et de deux puits d'ascenseurs.

La partie en surface a été réalisée à ciel ouvert à l'intérieur d'une enceinte en paroi moulée intégrée à la structure. Du fait de la nécessité de maintenir la circulation, les structures de surface ont été construites en plusieurs phases.

La partie en profondeur, de forme ovoïde, a pour dimensions extérieures 135 m de longueur, 22 m de largeur et 14 m de hauteur.

Compte tenu des dimensions importantes de la profondeur (35 m) et de la nature des terrains rencontrés (argiles consolidées), cette excavation souterraine a été réalisée par la méthode NATM à partir d'un puits d'accès (15 m x 22 m) situé à une extrémité de la station.

Le phasage initial de construction transversale et longitudinale se résume de la manière suivante :

- ◆ excavation de deux galeries latérales par pas de 1,5 m, avec soutènement provisoire constitué de :
  - 25 cm de béton projeté armé de 35 kg/m<sup>3</sup> de fibre d'acier,
  - ancrages type Swellex de 4 m de longueur à une maille de 1,5 m x 1,5 m ;
- ◆ excavation, mise en place des armatures et bétonnage des radiers (partie latérale) par tronçon longitudinal de 10 m ;
- ◆ mise en place des armatures et bétonnage des pieds droits en deux phases, par tronçon longitudinal de 10 m ;
- ◆ excavation de la partie supérieure du pilier central (zone de la voûte) situé entre les deux galeries précédemment exécutées par pas de 1,50 m avec soutènement provisoire constitué de :
  - 40 cm de béton projeté armé de 35 kg/m<sup>3</sup> de fibre d'acier,
  - ancrages type Swellex de 4 m de longueur à la maille de 1,5 m x 1,5 m ;
- ◆ excavation de la partie inférieure du pilier central et de la partie centrale du radier et réalisation



**Photo 1**  
Station Chelas  
construite entre  
deux rangées  
d'immeubles

*Chelas station  
built between  
two rows  
of buildings*



**Photo 2**  
Entrée du tunnelier  
à la station Chelas

*TBM break-out  
in Chelas station*

de celle-ci ;

- ◆ mise en place des armatures et bétonnage de la voûte par tronçon de 10 m.

Les excavations ont été réalisées avec une fraise électrique 110 kW montée sur une pelle hydraulique.

Le transport et l'évacuation des matériaux ont été effectués par "des charges et roule" en tunnel et grue à tour et bennes pour la remontée en surface.

En décembre 1996, alors que l'excavation des deux galeries latérales (a) ainsi que la construction des parties latérales du radier (b) et des piédroits (c) étaient terminés et l'excavation du pilier central

**Photo 3**  
Entrée du tunnelier à la station Olivais Sul  
**TBM break-out in Olivais Sul station**

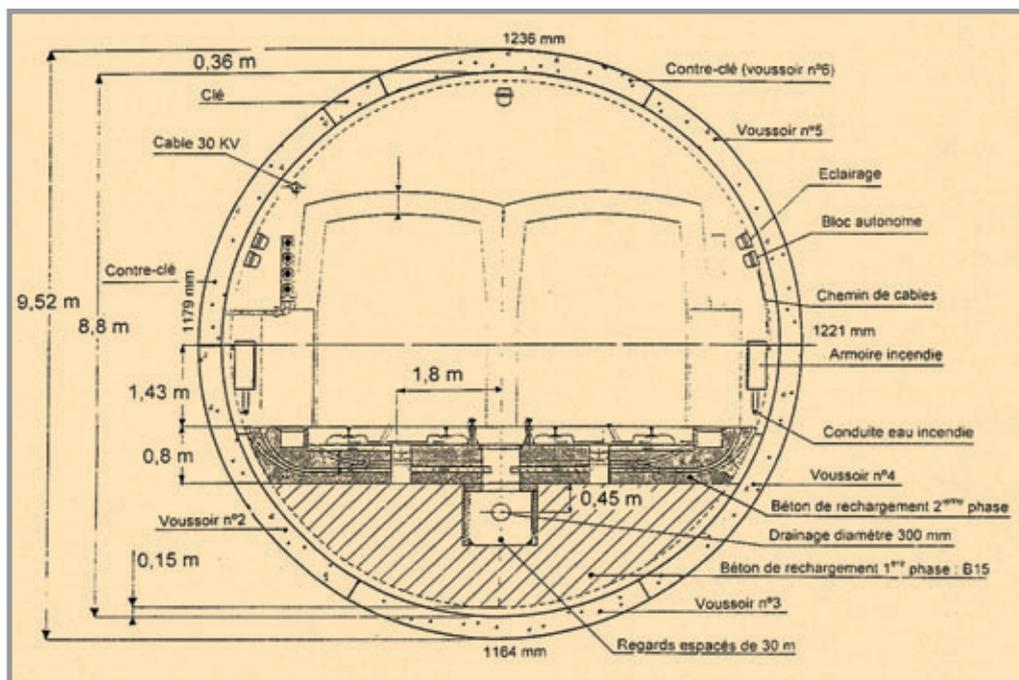


**Photo 4**  
Tunnelier à pression de terre Lovat  
**Lovat EPB - TBM**



**Figure 2**  
Section transversale du tunnel

**Tunnel cross section**



réalisée sur la moitié de la longueur, un effondrement de la voûte provisoire sur une longueur de 40 m s'est produit.

La présence d'une fracturation non prévue et non détectée dans cette zone lors de l'excavation des galeries latérales et des venues d'eau importantes au niveau de la voûte ont engendré des efforts dissymétriques qui ont conduit à la rupture de la voûte provisoire.

Après avoir assuré la tenue des structures de l'atrium déjà construites en surface, la zone de l'effondrement a été terrassée à ciel ouvert avec un soutènement provisoire des talus par béton projeté et cloutage passif.

L'excavation du pilier central a ensuite été reprise avec une méthode identique en réduisant le découpe à 1,20 m au lieu de 1,50 m, en posant par mesure de précaution des cintres réticulés à l'espacement de 1,20 m et en limitant à 20 m la zone de voûte sans revêtement définitif.

Les travaux de récupération du sinistre ont duré environ 7 mois et ont provoqué un arrêt du tunnelier d'environ 3,5 mois à 70 m de l'entrée de la station.

L'entrée en station du tunnelier s'est déroulée en mai 1997 après bétonnage du radier et de la voûte (photo 3). La plupart des structures béton ont été terminée en décembre 1997 à l'exception des galeries inclinées de liaison entre l'atrium et la nef. Les travaux de finition se sont déroulés durant le 1<sup>er</sup> semestre 1998 permettant l'ouverture de la station en août 1998.

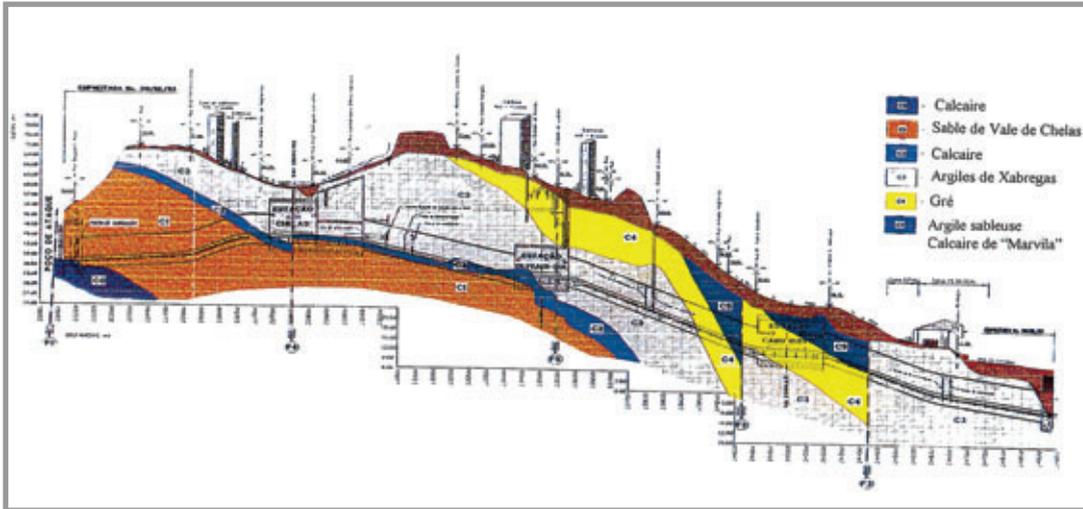
## ■ LA STATION CABO RUIVO

La station Cabo Ruivo (185 m de long et 20 m de large) située dans l'axe de l'avenue de Pádua, est la plus délicate à réaliser du fait des conditions environnantes :

- ◆ immeubles adjacents aux parois ;
- ◆ réseaux divers : gaz, électricité, téléphones ;
- ◆ conduites d'égout ;
- ◆ conduites d'eau sous pression de grands diamètres ;
- ◆ présence d'un ouvrage routier souterrain en cours de construction.

Ces conditions ont influé tant sur le choix de la structure (enceinte en parois moulées intégrées à la structure) que sur le phasage des travaux.

Après avoir effectué provisoirement des déviations de réseaux libérant longitudinalement la moitié de la rue, les parois moulées latérales et partiellement d'extrémité ont été réalisées (épaisseur 10 m, hauteur des panneaux entre 20 m et 25 m) ainsi que la moitié longitudinale de la dalle de couverture bétonnée au sol. Sur cette moitié de dalle ont pu être repositionnés définitivement les réseaux principaux, libérant l'autre moitié de la rue pour la réalisation de la seconde moitié de la dalle de couverture. L'ex-



**Figure 3**  
Représentation schématique de la géologie du tracé

*Scheme of geology lay-out*

cavation de la station sous la dalle de couverture s'est fait ensuite en sous-œuvre avec extraction des matériaux par des trémies laissées aux extrémités de la station. La dalle de fond et les structures intérieures (atrium, quais) ont ensuite suivi. Les structures intérieures principales ont été terminées en mars 1998 en parallèle avec le début des travaux de finition permettant la livraison de la station en juin 1998.

## ■ LE TUNNEL

### Généralités

Le tunnel principal d'une longueur totale de 2094 m et d'un diamètre intérieur de 8,80 m (figure 2) est divisé en quatre liaisons de longueur respective 526 m, 428 m, 540 m et 611 m et comporte une pente maximum de 4 % pour un rayon minimum de 225 m.

Le revêtement est constitué d'anneaux universels en béton de 1200 mm de longueur et de 360 mm d'épaisseur. Chaque anneau est constitué de six voussoirs et d'une clé, assemblés entre eux par des boulons droits.

### Le tunnelier

Le profil en long du tunnel imposé par la topographie du terrain et les pentes maximales d'exploitation conduisait à la construction de celui-ci dans les terrains sédimentaires du miocène suivants (figure 3) :

- ◆ ensemble C1 : sable de qualité variable allant du sable fin au grès tendre, comportant des lentilles de calcaire fossile grossier et d'altération de couleur jaune ou de grès dur ;
- ◆ ensemble C3a : argiles de Xabregas bleue fine surconsolidées comportant des bancs de calcaire fossile ;
- ◆ ensemble C4 : grès hétérogène de couleur jaunâtre ;
- ◆ ensemble C5 : formé de couche calcaire marneux fossilifère en partie basse et d'argile silteu-

se marron ou de sable argile (marron) en partie haute ;

- ◆ ensemble C3c : argile grise de plus faible liquidité que l'ensemble C3a.

Compte tenu de l'hétérogénéité des terrains traversés, du passage sous des immeubles et des voies de circulation et du délai, l'excavation du tunnel avec un tunnelier à pression de terre s'imposait. D'autres contraintes ont également dû être prises en compte dans la définition des méthodes et du tunnelier :

- ◆ les traversées des trois stations après réalisation de leurs excavations et de leurs radiers ;
- ◆ la libération du tunnel et donc le déplacement des installations de surface après la fin de l'excavation de chaque tronçon, de manière à commencer au plus tôt les travaux des structures intérieures des stations et de pose des voies en tunnel ;
- ◆ les emprises réduites en surface ;
- ◆ la réalisation du radier et du drainage en tunnel en simultané avec l'avancement du tunnelier.

Le tunnelier à pression de terre dont la construction a été confiée à Lovat est une machine articulée de 9,83 m de diamètre pouvant travailler en mode fermé jusqu'à 3 bars de pression, comme en mode ouvert (photo 4).

La tête de coupe est constituée d'un disque tournant dont la partie centrale forme un cône prééminent afin d'amorcer l'attaque du terrain et d'éviter l'agglomération de matériaux colmatants. Les six bras du disque peuvent être équipés de 66 outils de coupe (rippers ou molettes) accessibles depuis la chambre et de 220 scarificateurs.

Le taux d'ouverture est de 28 %. Deux outils de surcoupe variable disposés radicalement permettent d'ovaliser le profil afin de faciliter le passage en courbe et de réduire les frottements sur le corps de la machine.

Le guidage de la machine a été réalisé à l'aide d'un système Zed 261 et de quatre capteurs d'élongation fixés sur les vérins de poussée.

Le transport des déblais jusqu'à l'arrière du tunnelier a été fait par convoyeur (largeur 1200 m, vitesse 2 m/s). Deux trémies de stockage (70 m<sup>3</sup>) situées à l'arrière du train suiveur assuraient le

### LES CARACTÉRISTIQUES DU TUNNELIER "ÉTOILE DE L'ORIENT"

- Diamètre de coupe : 9,834 m
- Diamètre de la jupe : 9,796 m
- Longueur de la tête : 10,07 m
- Energie de coupe : 2025 kW
- Couple de coupe : variable de 7000 kW/m à 2000 kW/m
- Force de poussée maximale : 8000 t
- Vérins de poussée : 36 unités extension 1,75 m
- Vis d'extraction diamètre : 1,30 m capacité 7000 m<sup>3</sup>/h
- Poids total du tunnelier : 1280 t

Figure 4  
Schéma général  
du tunnelier  
TBM general  
lay-out

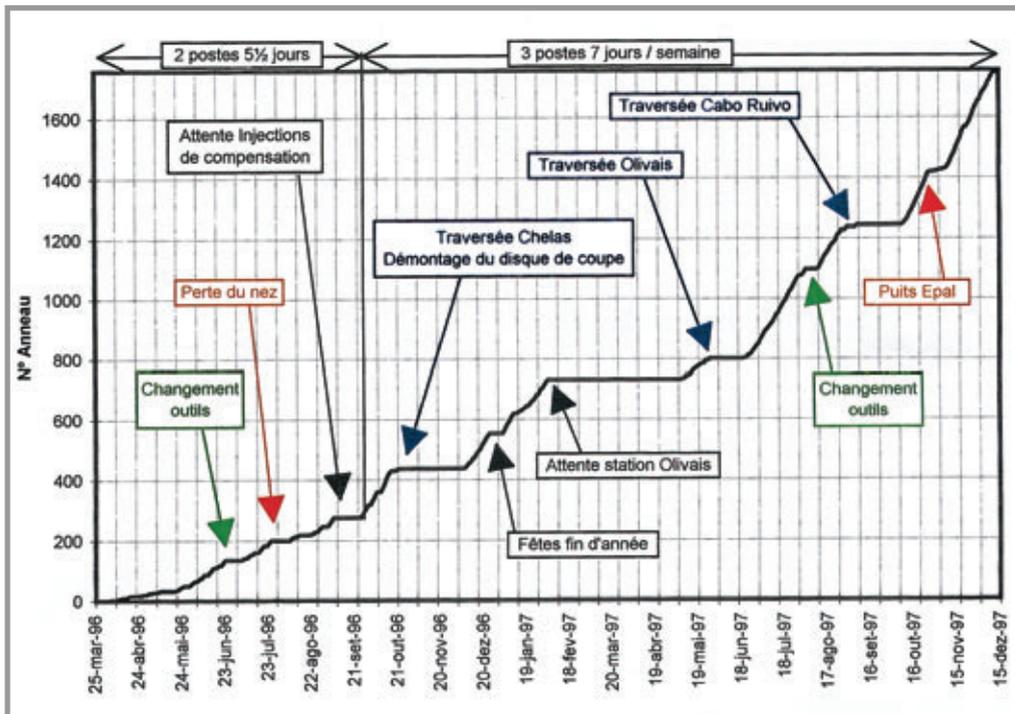
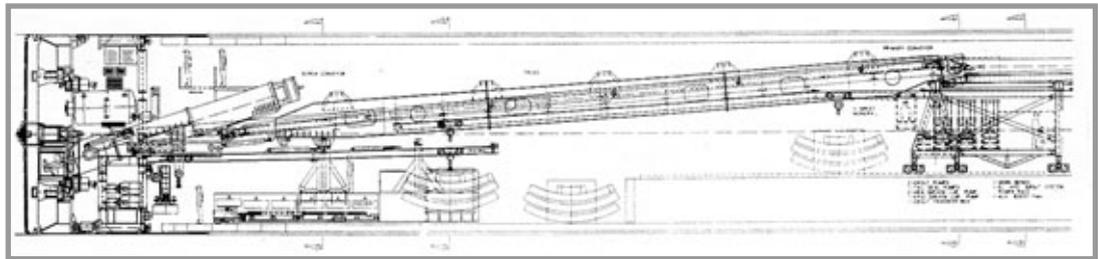


Figure 5  
Graphique d'avancement  
de l'excavation  
au tunnelier  
TBM progress data

chargement des camions d'évacuation du marirage vers les puits où celui-ci était remonté en surface à l'aide d'un portique de 30 t (figure 4). Le tunnelier est équipé de système de fabrication et d'injection de coulis bentonitique, de mousse et de polymère. L'injection des produits peut se faire dans la chambre ainsi que sur le disque de coupe. L'injection de coulis entre les voussoirs et le terrain se fait à travers la jupe à l'aide d'un rotodistributeur permettant une meilleure répartition du coulis.

## L'excavation

### Le premier tronçon : puits de départ/station Chelas

Ce premier tronçon de 522 m présente une couverture moyenne de 20 m et entre entièrement dans l'ensemble géologique C1 : sable avec alternance de lentille de calcaire et de grès. Compte tenu des résistances et de la nature des terrains, la tête a été équipée de rippers et l'excavation des cent premiers mètres est faite en mode ouvert. Il s'avère alors que les déblais ne parviennent pas à s'écou-

ler convenablement et s'agglutinent devant la tête empêchant l'avancement du tunnelier. Malgré l'injection de mousse, le couple est de 1800 Tm valeur limite et les déblais sortent à haute température. Du fait de la présence alors constatée de bancs gréseux, les rippers sont alors partiellement remplacés par des molettes. Malgré cette opération, la machine continue à progresser difficilement. Après analyse, il ressort que la mousse est détruite au contact du sable sec non cohésif. La faible quantité d'eau qu'elle apporte, confère alors suffisamment de cohésion aux matériaux abattus pour qu'ils se colmatent au centre de la tête. Un système d'injection d'eau sous pression est alors installé pour éviter ce colmatage central. Le tunnelier avance mieux mais du fait de l'aspect boueux des matériaux, il y a risque de débouillage par la vis d'extraction. De la boue bentonitique est alors utilisée sans plus de succès, car les déblais sont fluides mais ne présentent pas la consistance plastique nécessaire à la réalisation de pression de terre. C'est l'injection de polymère synthétique à très haut poids moléculaire qui va permettre de fluidifier convenablement le marin. Les efforts de cisaillement entre le front et le disque de coupe font fluer les déblais vers l'intérieur de la chambre.

L'eau restant captée par les polymères, les matériaux extraits conservent suffisamment de plasticité pour créer un bouchon de terre dans la vis. De la boue bentonitique est alors ajoutée en périphérie du disque pour réduire les pertes d'air, créant ainsi un environnement étanche propice à l'action des polymères. Le confinement est alors maîtrisé, le tunnelier progresse à la vitesse de 30 mm/mn avec 1,4 bars de confinement, une poussée totale de 3700 t et un couple de 1500 Tm. Par précaution, les deux immeubles de sept étages situés sur le parcours du tunnelier ont fait l'objet d'un renfort par jet grouting ainsi que d'injection de compensation. Les immeubles rehaussés de 3 mm par injection avant le passage ne sont pas redescendus par la suite, les tassements de surface moyens constatés sur la suite du tronçon ont été de 7 mm. Les sables ayant usé la périphérie du disque, celui-ci a été rechargé lors de la traversée de la station Chelas, un nouveau cône central a été monté et les molettes remplacées par des rippers afin d'affronter les argiles du tronçon suivant.

### Le deuxième tronçon Chelas/Olivais Sul

La foration dans les argiles n'a pas présenté de difficulté. Le confinement de 1,5 bars a été obtenu dès que les matériaux mélangés à de l'eau et de la mousse ont rempli la chambre. Le tunnelier

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Excavation au tunnelier : 175000 m<sup>3</sup>
- Excavation en tunnel traditionnel : 64000 m<sup>3</sup>
- Excavation à ciel ouvert : 320000 m<sup>3</sup>
- Béton en tunnel et voie : 70000 m<sup>3</sup>
- Béton de structure : 150000 m<sup>3</sup>
- Aciers : 22800 t
- Structures métalliques : 1700 t
- Parois moulées : 40000 m<sup>2</sup>
- Ancrages : 40000 ml



**Photo 5**  
Aspect du tunnel  
terminé  
*View of achieved  
tunnel*

progressé à 30 mm/mn avec 2600 t de poussée et un couple de 1.300 Tm. Un soulèvement en surface de quelques millimètres a été constaté lors de l'approche du tunnelier, suivi de tassements de 1 à 2 mm avec un maximum de 5 mm.

Les maisons et les immeubles de sept à huit étages situés au-dessus du tunnel ont subi des tassements de l'ordre de 2 mm.

#### **Le troisième tronçon Olivais Sul/Cabo Ruivo**

Les 230 premiers mètres du tronçon 94 ont été réalisés dans les argiles avec une tête équipée de rippers dans les mêmes conditions que le tronçon précédent. Lorsque les formations gréseuses ont été rencontrées, des molettes ont été mises en place et les polymères ont permis à nouveau de forer dans de bonnes conditions de confinement (1,1 bars) et d'avance de la machine (80 mm/mn, poussée 2300 t, couple 1600 Tm).

#### **Le quatrième et dernier tronçon Cabo Ruivo/puits de sortie**

Du fait des argiles plus silteuses et de la faible couverture (6 à 9 m), la pression de confinement théorique de 0,9 b s'est rapidement avérée insuffisante : tassement de 35 mm obtenus sur les premiers profils dans les argiles. Le confinement a alors été augmenté à 1,5 b de façon à obtenir un léger soulèvement à l'approche du tunnelier suivi d'un tassement d'environ 8 mm. Le tunnelier a progressé à la vitesse de 60 mm/mn avec 2700 t de poussée et un couple de 1200 Tm.

#### **Avancement**

Conçu et fabriqué en moins d'une année, le tunnelier a commencé l'excavation fin mars 1996 pour terminer au puits de sortie le 15 décembre 1997 (figure 5), soit après déduction du temps passé à la traversée des stations (4,5 mois au total) et de l'arrêt suite à l'accident géologique de la station Olivais Sul (3,5 mois) une durée d'excavation de 13 mois. Le dernier tronçon a été réalisé avec un avancement moyen de plus de 10 m jour.

Le tunnelier a été entièrement sorti du tunnel le 31 décembre 97 permettant le montage de la voie (photo 5) dans le dernier tronçon de manière à être prêt pour l'ouverture de la ligne en mai 1998.

#### **ENGLISH SUMMARY**

**The Lisbon metro  
Construction of the Vale de  
Chelas/Oriente section  
A new line serving the  
World's Fair**

A. Lacroix

The D-line of the Lisbon metro linking the existing network (Alameda station) to Oriente station located at the entrance of the Expo 98 grounds is a "flagship" project of the 1998 World's Fair, with its "Oceans" theme, in Lisbon until 29 September 1998. Its completion, and in particular the Vale de Chelas/Oriente section was complex owing to its different construction methods, and the existing constraints to deal with. The project's completion deadlines were also very short : three and a half years for project design and completion. This was a difficult challenge for everyone involved.

#### **DEUTSCHES KURZREFERAT**

**Die Lissabonner U-Bahn.  
Bau des  
Streckenabschnittes Vale  
de Chelas/Oriente.  
Eine neue Linie zur  
Weltausstellung**

A. Lacroix

Die Linie D der Lissabonner U-Bahn verbindet das vorhandene Netz (Bahnhof Alameda) mit dem Bahnhof Oriente am Eingang des Ausstellungsgeländes. Sie gehört zu den herausragenden Baumaßnahmen, die im Rahmen der zur Zeit in Lissabon unter dem Motto der Ozeane stattfindenden Weltausstellung '98 abgewickelt worden sind. Aufgrund der verschiedenen Baumethoden und der einzubeziehenden präexistenten Vorgaben gestaltete sich die Ausführung, insbesondere der Teilstrecke Vale de Chelas/Oriente, komplex. Auch die Terminalsituation war sehr eng : dreieinhalb Jahre für Planung/Konstruktion und Durchführung des Projektes. Alle Akteure standen einer schwierigen Herausforderung gegenüber.

#### **RESUMEN ESPAÑOL**

**El metro de Lisboa  
Construcción del tramo  
Vale de Chelas/Oriente  
Una nueva línea destinada  
a la Exposición Mundial**

A. Lacroix

La línea D del metro de Lisboa, que pone en comunicación la red existente (estación Alameda) con la estación de Oriente, ubicada en la propia entrada del parque Expo 98, constituye una de las obras "faro" de la Exposición Mundial, consagrada a los océanos y que tiene lugar actualmente en Lisboa, hasta el 29 de septiembre de 1998. Su ejecución, y fundamentalmente el tramo Vale de Chelas/Oriente ha resultado compleja debido a los distintos métodos de construcción necesarios, así como los imperativos existente que ha sido preciso integrar. Del mismo modo, los plazos de ejecución eran sumamente cortos : tres años y medio para el diseño del proyecto y ejecutar las obras. Se trataba, pues, de un reto difícil para el conjunto de participantes en la obra.

# Eole : les bétons de la gare Magenta

**Eole est la 5<sup>e</sup> ligne du Réseau Express Régional d'Ile-de-France, connectant entre elles des voies ferrées SNCF actuellement en terminus gare de l'Est et gare Saint-Lazare à Paris. La ligne nouvelle traverse Paris en souterrain et les deux gares Magenta et Condorcet offrent des correspondances avec sept lignes de métro, trois lignes de RER et des communications nombreuses avec les autobus. La gare Magenta a déjà été présentée dans la revue *Travaux*. Elle a été construite en souterrain et en sous-œuvre à 30 m de profondeur sous des bâtiments de construction ancienne du X<sup>e</sup> arrondissement. Les gares de l'Est et du Nord seront ainsi réunies par la gare Magenta d'Eole et grâce à Eurostar, Thalys et le TGV Est formeront peut-être au début du troisième millénaire le premier pôle ferroviaire du monde. La fluidité des échanges de voyageurs de train à train, objectif essentiel, sera obtenue par l'utilisation qui est faite des volumes, de la lumière et de la matière.**

**Chantiers Modernes a réalisé cet ouvrage selon des règles architecturales impératives et contractuelles qu'il a été nécessaire de prendre en compte dès les études dans les méthodes d'exécution. Il a fallu obtenir du premier coup le résultat demandé lors du génie civil primaire sans pouvoir compter sur des travaux de seconde phase pour enrichir la construction par des ajouts ainsi que cela se pratique souvent en travaux souterrains. Des procédés spéciaux de mise en œuvre des bétons et des procédures particulières de finition ont été utilisés.**

**L**a gare Magenta comprend la gare souterraine proprement dite constituée d'un tunnel central à deux voies et deux tunnels latéraux à une voie ainsi que deux grands ouvrages d'accès : le hall sud et la galerie Demarquay et deux passages vers la gare du Nord. L'ensemble de ces ouvrages s'inscrit dans un rectangle compact de 230 m par 100 entre la surface et le niveau - 30 m (photo 1).

Les méthodes de réalisation ont toutes été de type "travaux souterrains" c'est-à-dire : réalisation par petites parties avec une succession de phases de terrassement, soutènement puis revêtement en béton définitif.

L'enchaînement des phases a assuré le report des charges dues à la poussée des terres et au poids des ouvrages et la succession des plots réalisés à partir de trois accès de chantiers distincts a laissé progressivement apparaître l'ouvrage définitif sur une dizaine de fronts simultanés.

L'ordre des phases était imposé par des considérations purement techniques liées à la complexité des structures dans un cadre géologique difficile. Cependant, tous les coulages de ces ouvrages élémentaires devaient concourir à un résultat homogène ce qui n'était possible que par l'application de règles très strictes et une démarche qualité de tous les instants (photo 2).

## Les bétons

Les bétons de classe B25, B30 et B35 étaient obligatoirement à base de ciment CLK pour des raisons de résistance chimique aux eaux agressives du terrain. Ce choix va dans le sens de la couleur claire demandée et de sa stabilité dans le temps, d'une faible chaleur d'hydratation et d'une certaine inertie chimique vis-à-vis du phénomène d'alcali-réaction. Par contre, ce ciment présente les inconvénients d'une irrégularité de fabrication et d'une prise lente. Pour assurer la teinte claire exigée, il a été nécessaire d'utiliser des fillers blancs et des sables aussi clairs que possible. Les agrégats, visibles sur certains parements, devaient être de couleur blanche.

## Les parements

Ils ont été spécifiés comme suit :

- ◆ satinés pour l'ensemble des ouvrages ;
- ◆ glacés pour les loges et les escaliers des culées creuses ;
- ◆ bouchardés pour les zones de quais (photo 3).

## Les autres contraintes

Outre les phasages d'exécution et un planning très tendu, il fallut prendre en compte dans la préparation de chantier une très forte densité d'armatures aggravée par la finesse des lignes architecturales, la présence de très nombreuses boîtes de réservations et fourreaux incorporés au béton ainsi que les mises au point du projet en phase présynthèse et synthèse précisant les besoins des corps d'états techniques et secondaires.

Une dernière difficulté provenait de la présence en extrados d'une membrane d'étanchéité soudée de plot à plot.

## ■ L'ARCHITECTURE DES GARES

S'il est parfois des réalisations de transport de grande qualité, comme certains réseaux de métropolitain, il existe aussi de très nombreux espaces d'échange entre transports en sous-sol qui nient la spécificité de l'univers souterrain. Au modèle de la gare du XIX<sup>e</sup> siècle, lieu d'échange à deux dimensions entre la rue et le train n'a pas succédé une expression architecturale forte du lieu d'échange à trois dimensions entre les réseaux ferroviaires et les transports souterrains de la ville. Le projet des gares parisiennes d'Eole a permis de jeter un regard curieux sur l'architecture des dessous de la ville et proposer des traitements à ces espaces offerts aux citoyens avec la même attention que celle proposée aux ouvrages en surface. Une première constatation a été qu'il fallait offrir un espace de transport lisible, tel que le voyageur puisse appréhender du regard le chemin qu'il doit emprunter et les services qu'il veut utiliser. Cela conduit à concevoir des espaces d'une certaine ampleur pour permettre le passage des foules et permettre néanmoins à chacun de prendre des repères lointains, à l'horizontal ou vers le bas ou vers le haut, lui donnant une pré-vision de son cheminement.

Or la création de grands volumes est rarement compatible avec la construction en souterrain surtout lorsque les travaux sont exécutés sous les fondations d'immeubles existants, comme c'est généralement le cas des plus récents projets de transports en sous-sol.

On s'aperçoit cependant que même sous ces contraintes, il est possible de donner aux espaces une certaine lisibilité. Tout d'abord en utilisant au maximum les opportunités qu'offre la stricte logique

# architecturaux

**François Bertrand**

DIRECTEUR DE TRAVAUX  
Chantiers Modernes



**Roland Legrand**

ARCHITECTE DPLG  
SNCF



Photo 1  
Hall Sud -  
Sous la verrière  
*South Hall -  
Under the glazing*

Photo 2  
Galerie Demarquay.  
Butons et voûtes

*Demarquay Gallery  
Struts and arches*



Photo 3  
Béton bouchardé  
et béton glacé

*Hammer-finished concrete  
and glazed concrete*



**Photo 4**  
Départ d'escalier fixe  
depuis une loge  
*Fixed stairway  
from a lodge*



**Photo 5**  
Galerie Demarquay -  
Espace pour  
les voyageurs entrants  
*Demarquay Gallery -  
Space for incoming  
passengers*



► technico-économique : il est en effet intéressant d'exécuter le plus grand nombre de travaux à partir de la surface, même si cela conduit à acquérir des immeubles, à les démolir puis à les reconstruire en fin de chantier. La structure des volumes souterrains ainsi créés depuis la surface s'apparente alors à celle d'un bâtiment traditionnel, et des transparences entre volumes ou niveaux peuvent être ménagées.

Quand on construit par des techniques de travaux souterrains (c'est-à-dire sans accès à la surface à la verticale du volume excavé), la géométrie des espaces créés est beaucoup plus contrainte. Une règle simple de traitement des volumes s'impose alors : elle consiste à assurer un bon emboîtement entre ces espaces (photo 4). De la qualité de l'articulation entre deux volumes dépendra la lisibilité d'un changement de direction, ou du passage d'un lieu de simple circulation à un lieu de choix entre différents itinéraires.

Comme souvent en matière d'architecture, la concep-

tion des gares parisiennes d'Eole a tenté d'exploiter les contraintes du projet, en l'occurrence : deserte des quais à 30 m en profondeur, géologie peu homogène, forte densité des réseaux souterrains et des constructions à l'aplomb des ouvrages, faible emprise foncière permettant l'expression du projet dans la ville.

Ces sollicitations fortes de l'environnement ont demandé des solutions techniques adaptées, souvent innovantes, à l'image du savoir-faire de cette fin de siècle. De même que les grandes gares parisiennes du XIX<sup>e</sup> siècle ont glorifié la construction métallique, l'architecture des gares Eole met en valeur la technicité des ouvrages de génie civil souterrain dont le béton est l'expression plastique idoine.

L'importance des flux de voyageurs et leur gestion dans des espaces nécessairement dimensionnés par l'économie du projet, ont favorisé la composition spatiale par rapport à une vision en plan peu réaliste. Ainsi, la conception fonctionnelle qui a privilégié la séparation des flux de voyageurs "entrants" et "sortants", a tiré parti de cette mise en scène en volume (photo 5).

L'étude a défini quatre types d'espaces :

- ◆ les entrées, intégrées au rez-de-chaussée d'immeubles existants ou reconstruits à l'identique signalent Eole dans Paris. De fait, les accès prennent en compte le caractère historique du bâtiment d'accueil tout en exprimant déjà la qualité des traitements du projet ;

- ◆ deuxième type d'espace, les halls, contrastent des précédents par une certaine ampleur. Bien que contraints par les efforts de soutènement des terres ou des immeubles à l'aplomb, ils proposent des volumes suffisamment bien dimensionnés pour permettre la convergence des foules et offrir à l'individu des repères lointains dans les trois dimensions, lui donnant une pré-vision de son cheminement.

Des passerelles métalliques recouvertes de bois s'enroulent autour des structures massives en béton, favorisant par contraste l'impression d'espace offert aux voyageurs ;

- ◆ à partir des halls, on s'engouffre dans des piédroits ou galeries voûtées qui abritent les escaliers mécaniques et fixes, dont le parement glacé et l'exiguïté montrent combien la sollicitation de la matière est forte. Ce système circulatoire, troisième type d'espace est le plus contraint de la gare. Il accompagne les voyageurs jusqu'aux portes du quai que sont les loges, sortes de soupiraux dans les fondations de la ville que forment les piédroits de culées creuses ;

- ◆ aboutissement du cheminement, le quatrième type est constitué par les quais. Là, le voyageur marquera éventuellement un temps d'arrêt en attente du train, parfois suffisamment long pour s'asseoir, lire et apprécier son environnement. Quelle que soit l'heure de la journée, cet espace doit proposer une ambiance sécurisante où l'éclairage gé-

néreux, non agressif donc chaud, et la sonorisation douce et ciblée contribuent à apaiser les sens très sollicités jusque-là.

Les objectifs de cette démarche sont clairs :

- ◆ offrir une bonne lisibilité des ouvrages, c'est-à-dire qu'il y aura une continuité visuelle entre le bas de la gare et la lumière du jour;
- ◆ favoriser l'orientation et réduire les distances;
- ◆ lutter contre les impressions d'enfermement;
- ◆ proposer un autre confort au voyageur.

Devenu la pierre angulaire de la conception fonctionnelle, le bien-être des voyageurs a été particulièrement étudié dans les traitements de surface et matériaux de second œuvre.

## ■ LA MATIÈRE COMME EXPRESSION

Autant que la lumière référence à la nature, source de vie dans un espace souterrain, la matière peut raconter : raconter le lieu, la structure qui soutient la ville, raconter son mode de fabrication, les travaux de génie civil. Il est pour ce récit un langage privilégié, et qui a encore beaucoup à dire : le béton, car c'est par excellence le matériau contemporain des structures (photo 6).

Cette prédominance du registre structurel n'est pas fortuite : dans toute gare, l'organisation dans l'espace du passage des trains, l'implantation et la protection du cheminement de voyageurs, conduisent à concevoir des franchissements et des couvertures qui se traduisent par un jeu de structures porteuses et de structures portées. Dans le monde souterrain s'ajoute une contrainte (et donc un outil de conception) supplémentaire : le soutènement de la ville, au-dessus, et des terres sur les côtés. Ainsi, un des ouvrages majeur de la gare Magenta est la voûte active des quais centraux, fortement texturée par ses voussoirs laissés apparents pour mieux donner à lire toutes ces sollicitations. Le travail sur le béton lui-même est primordial. Si le choix du ciment est généralement imposé pour une grande partie des ouvrages, construits au contact même du sol naturel, le choix des agrégats et la détermination de la granulométrie peuvent en revanche être optimisés en fonction de l'aspect recherché et en combinaison avec le choix du traitement de surface du béton. Enfin, l'aspect final de la surface pourra être déterminé soit par un parement particulier du coffrage (coffrage en bois, acier inoxydable, feuille de polyane pour parement "glacé"...), soit par un traitement mécanique ou chimique après décoffrage.

Ainsi travaillé, dans sa masse comme en surface, le béton se révèle la plus riche des matières. La "peau" du béton peut devenir une étoffe sensible à la vue et au toucher, présence minérale traduisant l'esprit du lieu, sous-sol de ville et monument pour les foules. Tandis que sa pleine masse ex-



Photo 6  
Vue du tunnel central depuis une loge

View of central tunnel from a lodge

prime à merveille la puissance des structures mises en œuvre pour retenir les terres et soutenir la ville. S'il forme un "fond" de premier choix, le béton n'est certes pas pour autant la seule matière utilisable, et sa puissance visuelle n'est, en particulier, jamais plus forte que lorsque d'autres matières (plus "nobles") sont utilisées en contrepoint, comme le bois, le métal ou le verre. Dans le projet Eole, par exemple, seule la structure primaire de l'ouvrage est en béton et les planchers construits à l'intérieur des volumes, y sont en acier et en bois. Ce travail sur la matière a enfin des répercussions sur la lecture de l'espace, puisqu'en distinguant ainsi la circulation de l'enveloppe volumétrique, on donne clairement à lire les contours de cette dernière.

## ■ LES MÉTHODES D'EXÉCUTION

### Mise au point des bétons

Une centrale à béton spécifique a été installée ainsi qu'un laboratoire comptant jusqu'à six personnes en période de pointe.

**Les études de laboratoire** ont conduit à sélectionner les fourchettes de composition des différents constituants permettant de satisfaire aux critères mécaniques et à la conformité par rapport aux échantillons, référence contractuelle de teinte et d'aspect.

**Les essais de convenance** en centrale ont permis de poursuivre la mise au point des formules par des recherches sur les mélanges de sables et les adjuvants.

**Les essais en vrai grandeur** sur des échantillons de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup> ont permis de tester différents types de peaux coffrantes et un certain nombre d'accessoires :

- ◆ cales à béton;
- ◆ profilés pour joints;

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

**Maître d'ouvrage et maître d'œuvre**  
SNCF

**Entreprise de génie civil**  
Chantiers Modernes

**Bureaux d'études**

- Setec - TPI
- Dumez GTM
- Chantiers Modernes

**Centrale à béton**

Orsa bétons

**Cimentier**

Ciments d'Origny (usine de Lumbres)

**Armatures**

CIA

**Etanchéité**

Sofrete

**Voussoirs préfabriqués**

Hurks béton

**Agrégats 4/20**

SCBV (Bannost-Villegagnon)

**Sables 0/4**

- SCBV (Bannost)
- GSM (Achères)
- GSM (Balloy)

**Filler**

Sifracco



- ◆ résines polyuréthanes pour revêtement de coffrages ;
- ◆ produits décoffrants ;
- ◆ adjuvants complémentaires.

Enfin, la dernière étape a été celle des difficultés de **mise en œuvre** et des recherches sur l'ouvrabilité des bétons. Selon la saison et les variations climatiques, les durées de transport et les temps de déchargement, il fallut jouer simultanément sur les adjuvants en centrale, les adjuvants sur site et les marges de variation du dosage en ciment, sables et filler pour obtenir la thixotropie convenant au pompage, les résistances et compacité exigées et l'aspect esthétique demandé.

Les clefs de la réussite ont été :

- ◆ l'ajout des additifs en 2 ou 3 temps, fluidifiant réducteur d'eau, retardateur et plastifiant, à la centrale dans l'eau de gâchage ou dans le malaxeur puis à l'arrivée sur chantier et le contrôle de la rhéologie du béton sur les deux sites ;
- ◆ l'utilisation de trémies-tampons agitatrices aux postes de pompage des bétons ;
- ◆ un rigoureux contrôle des matériaux livrés ;
- ◆ un plan d'assurance qualité spécifique à la centrale à béton ;
- ◆ le suivi des durées de prise par maturimètre permettant d'éviter aussi bien les échauffements nuisibles du béton que les prises trop lentes retardant le décoffrage ;
- ◆ la mise au point ultérieure d'un microbéton 0/12 en remplacement du 0/25 pour les cas d'exceptionnelle difficulté de mise en place.

Bon an, mal an, les bétons ont été homogènes dans leur teinte, malgré les étés chauds et les hivers froids, malgré les variations d'agrégats au gré des filons en carrière et des gisements de sable, malgré les variations des laitiers du CLK car les différents composants du mélange se sont équilibrés et ont ainsi atténué leurs écarts.

### Mise au point des coffrages

Les études et recherches sur les peaux coffrantes ont conduit lors des essais en vrai grandeur à tester les surfaces suivantes :

- ◆ parement satiné :
    - tôle acier + zingage par métallisation au pistolet,
    - tôle inox 6 mm,
    - tôle acier noir cirée,
    - contreplaqué bakélinisé ;
  - ◆ parement glacé :
    - contreplaqué + tôle émaillée sans huile de décoffrage,
    - contreplaqué + résine polyuréthane,
    - contreplaqué + polyane.
- A cette occasion ont été testés et contrôlés par l'architecte :
- les huiles et cires de décoffrage,
  - les cales à béton,
  - les minéralisateurs,

- les protections mécaniques de parement.

Les décisions prises ont été en faveur :

- ◆ des coffrages outil en tôle noire brossée à la main (photo 7) et des contreplaqués bakélinisés pour les coffrages satinés ;
- ◆ des contreplaqués + polyane 500 microns pour les glacés ;
- ◆ des cires plutôt que des huiles de démoulage pour leur qualité antibullage ;
- ◆ d'un minéralisateur en phase aqueuse pour ses effets antipoussière, hydrofuge, durcisseur et égalisateur de teinte ;
- ◆ de protections par feuille de drainage Delta-MS (photo 8).

Le nombre de réemploi des peaux a été limité.

Les contreplaqués bakélinisés n'ont été acceptés qu'avec un soin particulier apporté au masticage des joints et des têtes de vis ainsi que le languetage entre panneaux jointifs.

La tôle émaillée a donné un résultat exceptionnel mais était d'un emploi trop délicat pour les conditions d'un chantier de ce type. La tôle noire brossée n'a été acceptée qu'après des essais de réemploi avec traitement de l'oxydation de la tôle.

La préconisation d'un enrobage des aciers de 40 mm pour des raisons de calcul a été dans le sens de la qualité du parement car, trop faible, il est souvent à l'origine de défauts visuels.

Pour le bouchardage il a été retenu un travail manuel au pistolet pneumatique avec une tête à 25 dents et un tramage orthogonal en deux passes à la règle sur une profondeur de 1,5 mm pour faire apparaître les agrégats.

### Le déroulement des travaux

L'ensemble des dispositions retenues lors des essais a donné satisfaction. Néanmoins, un certain nombre de difficultés ou de défauts apparus au fur et à mesure des travaux ont nécessité des modifications de détails et permis des améliorations :

- ◆ moules pour joints aimantés sur la peau des outils métalliques ;
- ◆ traitement préventif à la cire après nettoyage en attente d'une utilisation ultérieure des coffrages en tôle ;
- ◆ position des pipes et trappes de bétonnage dans les zones moins visibles du public ;
- ◆ boulons de centrage pour ajuster les panneaux assemblés ;
- ◆ feutre provisoire de protection de la peau pendant le ferrailage ;
- ◆ obligation de suspendre les cages d'armatures en voûte ;
- ◆ augmentation des fréquences de vibration et baisse des puissances ;
- ◆ nécessité d'assurer le clavage avec le béton précédent par pompage sous pression par le bas des panneaux dans le cas très fréquent des bétons réalisés "en descendant".

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

#### Terrassements

215 000 m<sup>3</sup>

#### Bétons

87 000 m<sup>3</sup>

#### Armatures

10 200 t

#### Coffrages

85 000 m<sup>2</sup> dont :

- satinés : 43 000 m<sup>2</sup>
- glacés : 5 000 m<sup>2</sup>
- bouchardés : 2 600 m<sup>2</sup>

#### Fourreaux

35 000 ml

#### Boîtes de réservations

3 900 u

#### Étanchéité

46 000 m<sup>2</sup>

## ■ LES PROCÉDURES ET L'ORGANISATION MISES EN PLACE

Les options architecturales, notamment la forte présence du béton brut de décoffrage laissé apparent, ont nécessité beaucoup de vigilance de la part des maîtres d'œuvre et une grande écoute de la part de l'entreprise. Car la complexité des mises en œuvre et leur phasage ont obligé les acteurs de la construction à un véritable dialogue pour obtenir la qualité des parements exigée parce que vus du public en définitif (photo 9).

Les joints ont été calepinés, les trous de banche tramés, les peaux coffrantes nettoyées et auscultées après chaque bétonnage, puis traitées pour maintenir la qualité des finitions définie lors de la procédure de prototypage selon un cahier des charges préétabli.

L'entreprise a mis au point plusieurs formules de béton d'après les préconisations du maître d'œuvre en fonction de la nature des ouvrages et de l'aspect recherché (bouchardage).

Des équipes de chantier dédiées spécifiquement à la qualité de l'œuvre côté entreprise ont suivi l'ensemble de la production. Aux balbutiements des premières recherches et approbations des bétons architectoniques ont succédé des échanges fournis entre les intervenants pour améliorer constamment la production. Fondée sur quelques procédures de contrôle strictes (contrôles interne et externe), la qualité de l'ouvrage a progressé au cours de son édification sans nuire au bon avancement du chantier. A titre d'exemple, des procédures ont été mises en place pour :

- ◆ la réception des outils coffrants en usine (calepinage des panneaux) ;
- ◆ la réception des coffrages en place ;
- ◆ le constat des parements décoffrés avant nettoyage ;
- ◆ les opérations de nettoyage et minéralisation ;
- ◆ les opérations de traitement de finition et de réparation.

Une formation des personnels a été conduite sur ce sujet spécifique. Des guides pratiques ont été rédigés.

## ■ LES TECHNIQUES DE FINITION

La notion même de ragréage ou d'enduit étant prohibée, les techniques de finition n'ont été utilisées que pour des réparations en cas d'accident ou rarement d'erreur lors des opérations de coffrage, bétonnage ou décoffrage. Les différents défauts constatés ont été : bullage, cales à béton visibles, nid de cailloux, faïençage, épaufrures d'angle, canaux de ressuage, déformation du coffrage avec dépassement des flèches admissibles (3 mm au règle de 20 cm, 4 mm à la règle de 2 m), désaf-



**Photo 7**  
Bétonnage d'un déambuloire à l'aide d'un coffrage-outil

*Concreting an ambulatory by means of sectional formwork*

fleurement supérieur à 1 mm, trace de rouille, etc. mais aussi des problèmes de teinte beaucoup plus difficiles à régler :

- ◆ taches dues à des coulures de laitance ;
- ◆ stratifications dues aux couches successives en cours de bétonnage ;
- ◆ écarts de couleur dus aux différences de vibration, de carbonatation ou aux écarts thermiques entre zones d'un même coulage ou mêmes taches noires indélébiles dues aux migrations des parties les plus fines du ciment pour ces mêmes raisons ;
- ◆ "fantômes" grisâtres causés par l'incrustation de poussières concentrées en certains points par le flux du béton dans le coffrage.

Dans ces cas, les réparations étaient nécessaires. De plus, un certain nombre de rebouchages étaient obligatoires : boîtes de tirants, boîtes de bétonnage et tiges de coffrages.

Le plissage aléatoire du polyane créant l'aspect souhaité par l'architecte a aussi dans quelques cas présenté des excès du fait des mouvements de l'air emprisonné. Les actions à conduire étaient alors décidées contradictoirement et consistaient selon les cas :

- ◆ à passer des produits de traitement acide ou basique selon la réaction chimique souhaitée ;
- ◆ à poncer légèrement à la main avec nettoyage à l'eau chaude ou aux décapants ;
- ◆ à poncer au disque abrasif à sec avec aspirateur de poussières ;
- ◆ à repiquer par bouchardage dans les cas plus graves ;



**Photo 8**  
Culée centrale coulée en galerie souterraine

*Central abutment pier cast in an underground gallery*



**Photo 9**  
Galerie Demarquay - Escalier latéral nord

*Demarquay gallery - North side stairway*



◆ à recharger à l'aide de produits fabriqués spécialement au laboratoire en sachets de 500 g et 1 kg et sacs de 5 kg.

Les formules des produits de finition ont été mises au point et sélectionnées dans une palette de plusieurs dizaines d'échantillons. Elles sont au nombre de 15 comprenant plusieurs sables et plusieurs fillers en plus du ciment. Les matériaux ont été étuvés avant ensachage pour une meilleure conservation.

Sur le chantier, le gâchage se fait avec de l'eau et des minéralisateurs de masse. Selon la finesse, le classement des produits est :

- ◆ microbéton ;
- ◆ mortier grossier ;
- ◆ mortier fin ;
- ◆ barbotine.

Les défauts sont traités individuellement au cas par cas et non zone par zone. L'humidification du support à chaque étape se fait par pulvérisation d'eau. Dans tous les cas, l'intervention comporte en premier lieu au moins un ponçage à la main pour rouvrir les pores du béton et à la fin une minéralisation pour reconstituer sa surface dure et étanche. Les joints sont repris à la meuleuse.

## ■ BILAN

Le coût des opérations nécessaires à l'obtention d'un tel résultat est important. L'analyse détaillée est en cours puisque les finitions sont terminées depuis peu. Cependant, le résultat global est connu. Le génie civil de la gare Magenta est un chantier d'environ 2 500 000 heures de main d'œuvre ce qui représente près de 29 heures au m<sup>3</sup> de béton tout confondu. Le bilan véritable est celui que pourra faire l'usager pendant des dizaines d'années tout au long du XXI<sup>e</sup> siècle. Nul doute qu'il est satisfaisant et enthousiasmant !

## ENGLISH SUMMARY

### Eole. The architectural concrete of the Magenta train station

Fr. Bertrand, R. Legrand

Eole is the fifth line of the Greater Paris Regional Express Railway connecting the French Railways national lines presently terminating at the Gare de l'Est and Gare Saint-Lazare stations in Paris. The new line goes through Paris underground, and the two stations, Magenta and Condorcet, offer connections with seven metro lines, three RER lines and many other transfers with the bus system. The Magenta station was already described in Travaux. It was built underground with underpinning at a depth of 30 m beneath buildings of old construction in Paris' X arrondissement. The Gare de l'Est and Gare du Nord stations will thus be connected by the Magenta-Eole station and, thanks to Eurostar, Thalys and the TGV East will perhaps form, at the beginning of the third millennium, the world's leading railway system. The fluidity of passenger exchanges from train to train, an essential objective, will be achieved by the appropriate use of volumes, light and matter. Chantiers Modernes designed the Magenta station structure in accordance with imperative and contractual architectural rules that had to be taken into account as of the design phase. It was necessary to get right the first time the effect specified during the preliminary civil engineering without being able to rely on works of the second phase to modify the construction by additions, as is often done in underground works. Special concrete placement procedures and special finishing procedures were used.

## DEUTSCHES KURZREFERAT

### Eole - Die architektonischen Betonarbeiten am Magenta-Bahnhof

Fr. Bertrand, R. Legrand

Eole ist die fünfte Linie des Schnellbahnnetzes RER Ile-de-France (Réseau Express Régional) des Pariser Beckens. Sie verbindet die zur Zeit am Ostbahnhof und am Saint-Lazare-Bahnhof endenden Streckenführungen der französischen Eisenbahn SNCF. Diese neue RER-Linie unterquert Paris. Die beiden Bahnhöfe Magenta und Condorcet sichern den Anschluß an sieben U-Bahn-Linien, drei RER-Linien und an zahlreiche Buslinien. Der Magenta-Bahnhof ist bereits in einer Travaux-Ausgabe vorgestellt worden. Er ist unterirdisch mit Gründungen bis zu 30 m Tiefe unter den alten Wohnhäusern des 10. Arrondissement gebaut worden. Die Pariser Nord- und Ostbahnhöfe werden so über den Eole-Bahnhof Magenta miteinander verbunden, und mit den Hochgeschwindigkeitszügen Eurostar, Thalys und TGV Est werden sie möglicherweise zu Beginn des dritten Jahrtausends den größten Eisenbahnknoten-

punkt der Welt bilden. Das flüssige Umsteigen der Reisenden, wesentliches Ziel des Gesamtprojektes, wird durch die optimierte Nutzung der Volumina, des Lichtes und der Baustoffe erreicht. Chantiers Modernes hat dieses Bauwerk in einem strikt vorgegebenen architektonischen und vertraglichen Rahmen realisiert, der schon bei Planung und Konstruktion in der Ausführungsmethodik zu berücksichtigen war. Bereits in der ersten Tiefbaustufe mußte das geforderte Ergebnis erzielt werden, denn ein Abwarten der zweiten Phase zur Bereicherung und Ergänzung des Rohbaus, wie dies oft bei unterirdischen Bauvorhaben praktiziert wird, war hier ausgeschlossen. Es sind spezielle Betoneinbau- und Abschlußbearbeitungsverfahren zum Einsatz gekommen.

## RESUMEN ESPAÑOL

### Eole. Hormigones arquitectónicos de la estación Magenta

Fr. Bertrand y R. Legrand

Eole es la quinta línea de la R.E.R. - Red Expres Regional de Ile de France - que conecta entre sí las vías férreas de los Ferrocarriles Franceses (SNCF) actualmente en los terminales de la estación del Este y estación Saint Lazare de París. La nueva línea atraviesa París en subterráneo y las dos estaciones Magenta y Condorcet que disponen de correspondencias con siete líneas de Metro, tres líneas de R.E.R. así como numerosas comunicaciones con los autobuses. La estación Magenta fue ya presentada en la revista Travaux. Su construcción se ha efectuado en subterráneo y con recalce de cimientos a 30 m de profundidad bajo inmuebles de construcción antigua del Distrito X. Las estaciones del Este y del Norte estarán así reunidas por la estación Magenta de Eole y, mediante Eurostar, Thalys y el tren de alta velocidad (TGV) habrán de constituir, posiblemente, a principios del tercer milenario, el primer polo ferroviario del mundo. La fluidez de los movimientos de pasajeros de tren a tren, objetivo primordial, se obtendrá por la utilización de los volúmenes, de la luz y de la materia. Chantiers Modernes - empresa constructora - ha llevado a buen término estas obras según requerimientos arquitectónicos imperativos y contractuales, que ha sido preciso tener en cuenta desde los estudios en los métodos de ejecución. Así, ha sido preciso obtener, del primer golpe, el resultado impuesto al proceder a las obras de ingeniería civil primarias, sin poder contar con los trabajos de la segunda etapa para enriquecer la construcción por complementos incorporados, así como es costumbre frecuentemente al proceder a obras subterráneas. Se han puesto en aplicación procedimientos especiales de implementación de los hormigones, así como procedimientos particulares de acabado en obra.

# Le tunnel sous la Manche réparé en 60 jours

Le revêtement du tunnel sous la Manche est constitué d'anneaux de diamètre intérieur de 7,60 m en béton préfabriqué de 1,60 m de large, comportant chacun six voussoirs dont une clé de 0,40 m d'épaisseur. Lorsque, dans la nuit du 18 au 19 novembre 1996, se propage un violent incendie à 18 km de l'entrée côté France, 300 anneaux sont endommagés sur une longueur de 480 m. Le béton est littéralement rongé sur une épaisseur de plusieurs centimètres, les armatures et les rails dilatés sous l'effet de la chaleur voisine de 1000 °C... Le sinistre de la galerie sud du tunnel sous la Manche a nécessité le lancement d'un chantier exceptionnel à 90 mètres sous le niveau de la mer. La solution qui consistait à remplacer le revêtement par de nouveaux voussoirs ayant été écartée, Freyssinet a alors proposé la technique du béton projeté par voie sèche. Après un diagnostic établi par Setec TPI, un train-travaux a été spécialement aménagé par Freyssinet, dans le délai record de quinze jours. Au terme d'un chantier en 3 x 8, 7 jours sur 7, mobilisant près de 300 personnes, Eurotunnel pouvait réceptionner les travaux.

## ■ QUATRE TYPES DE DÉGRADATION

L'examen des dommages, établi par Setec TPI, révèle six zones plus ou moins touchées par le sinistre :

- ◆ zone 1. Le béton a été dégradé de façon superficielle sans rendre apparents les aciers de la nappe d'armatures située à l'intrados du revêtement ;
- ◆ zone 2. Le béton a été plus gravement creusé par le feu, sur des profondeurs variant de 5 à 10 cm. Les aciers sont apparents. Sur une vingtaine d'anneaux, l'épaisseur du béton résiduel est voisine de 25 cm ;
- ◆ zone 3. De loin, la plus touchée par le sinistre. Le béton a été fortement dégradé, parfois jusqu'à l'extrados des voussoirs ; les aciers d'intrados sont tous apparents. L'épaisseur de béton résiduel varie entre 5 et 20 cm ;
- ◆ zone 4. Là aussi, le béton a fortement souffert, les aciers d'intrados sont apparents. L'épaisseur de béton résiduel en voûte est voisine de 20 cm ;
- ◆ zone 5. Le béton éclaté a entraîné l'apparition des aciers mais son épaisseur résiduelle est restée supérieure à 25 cm ;
- ◆ zone 6. Le béton a subi une dégradation superficielle sans que les aciers soient apparents.

Les observations sur le terrain, les essais non destructifs et les essais en laboratoire, ont permis de démontrer que les caractéristiques mécaniques du béton résiduel n'étaient pas modifiées. De même, la garde initiale entre le revêtement et le gabarit

**Philippe de Pins**



DIRECTEUR  
Freyssinet - France Nord

**Philippe Zanker**



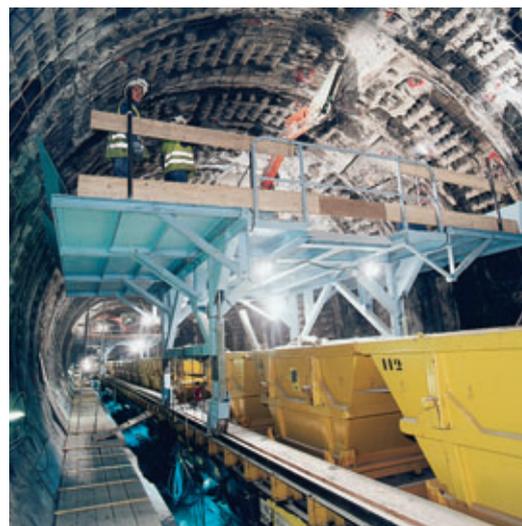
DIRECTEUR D'AGENCE  
Freyssinet - IDF Nord-Ouest

**Jean-Marie Demorieux**



DIRECTEUR  
Setec TPI

Photos : Q.A. Photos Ltd.



Equipements  
du train-travaux  
*Equipment  
of work train*



Les passerelles  
de service  
*The service  
gangways*



**Piquage  
du béton**  
*Chipping  
of concrete*

**Soudure  
des croisements  
de barres**

*Welding  
of bar crossings*



► des équipements fixes ou du matériel roulant n'avait pas varié. Enfin, l'incendie n'avait pratiquement pas affecté les piédroits en partie basse, le béton des trottoirs et de la voie. Il était donc possible de les conserver en l'état et de procéder aux réparations de la voûte en utilisant la technique du béton projeté par voie sèche, tout en conservant les nappes d'armature du revêtement initial après réparation des zones les plus touchées. La conception du projet de réparation a été élaborée par Setec TPI puis mise au point avec Freyssinet lors de l'exécution des travaux.

## ■ LA RÉHABILITATION

Les premiers travaux de réparation ont nécessité une démolition mécanique des bétons éclatés, vous-

soir par voussoir, selon leur degré de détérioration, puis un piquage manuel, suivi d'un sablage général avant d'entreprendre les travaux de ferrailage et d'injection de coulis, la pose de gabarits, une première projection de béton fibré de restructuration, une seconde projection de finition, sans fibres métalliques, pour terminer enfin par quelques travaux annexes tels que la pose de drains et divers ragréages en surface.

Des mini-pelles ont été utilisées pour purger les surfaces des débris prisonniers des aciers et éviter ainsi tout risque de chute. Ensuite, le sablage à sec a été réalisé à partir d'une passerelle totalement confinée pour limiter les risques de projection d'abrasif et l'émission de poussières. Ces poussières étaient par ailleurs traitées par un dispositif de filtration humide installé sur un portique, à proximité de la passerelle. Pour le ferrailage, il

### LES INTERVENANTS

**Maitre d'ouvrage**

Eurotunnel

**Adjudicataire**

Freyssinet

**Diagnostic, conception et mise au point du projet de réparation**

Setec TPI

**Sous-traitant**

Cogifer

### UN TRAIN - TRAVAUX SPÉCIAL

L'approvisionnement des équipements, du matériel et des matériaux du chantier ont nécessité la mise au point d'un train-travaux de 720 m de long, doté de 36 wagons dont 22 équipés d'un chemin de roulement permettant le déplacement des portiques et des passerelles de travail affectés aux différents ateliers.

Ce train "Puscal" fut aménagé en quinze jours par Freyssinet, sur les emprises ferroviaires d'Eurotunnel. Il comprenait :

- des passerelles de service,
- des portiques outils,
- des portiques de manutention,
- un système complet de transfert de bennes.

Les huit passerelles furent construites sur mesures avec des profilés métalliques par mécano-soudure et platines boulonnées. Toutes étaient équipées de planchers de travail, de garde-corps, de protections, d'accès, de réseaux distribution des

fluides et de dispositifs d'éclairage (400 projecteurs au total).

Les passerelles affectées au sablage et au béton projeté furent équipées de diaphragme pour confiner les risques de projection. Les enceintes ainsi délimitées étaient équipées pour traiter en ventilation les pollutions à la source.

Ce traitement se faisait par filtration humide pour le sablage, et par filtration sèche pour le béton projeté.



**Atelier de projection  
sur train-travaux**  
*Spray plant  
on work train*



**Projection  
du béton  
de restauration  
fibré**  
*Spraying  
of fiberised  
restoration  
concrete*

a fallu tout d'abord repositionner les armatures existantes, compléter les barres manquantes et re-façonner les nappes d'acier par soudure, puis forer et sceller des épingles en reprise de bétonnage. Des tubes cintrés en PVC Ø 32 furent fixés aux armatures pour matérialiser la voûte. Disposés tous les 1,60 m, ces arceaux permirent de régler la surface de finition en béton projeté au gabarit d'origine. Pour la mise en œuvre du béton, deux trémies avec vis d'alimentation, spécialement étudiées pour alimenter quatre machines à projeter furent embarquées sur le train-travaux (voir encadré). L'ensemble trémie-machine à projeter était asservi par un dispositif d'automatismes commandé à distance depuis le poste de projection. Le béton sec était légèrement prémouillé dans la vis d'approvisionnement de façon à réduire les poussières lors de la projection.

## ■ LA GESTION DES ÉQUIPES

Deux équipes pour un même défi, l'une en surface, l'autre sous la mer, à 20 km l'une de l'autre, constituées de : Alain Maguet, chef de projet et concepteur de la méthode de réparation, trois cents personnes et le concours d'un directeur des travaux, de deux conducteurs de travaux en surface et en poste dans le tunnel, d'un responsable administratif, de deux agents qualité, d'un ingénieur sécurité et de son adjoint, d'un responsable planning méthodes assisté de deux collaborateurs. Les courts délais alloués nécessitèrent une organisation en 3 x 8, 7 jours sur 7, avec 5 équipes en rotation. A chaque relève de poste, le conducteur de travaux en tunnel informait le conducteur de travaux en surface de l'état d'avancement du chantier. Ensuite ces informations étaient transmises

## CINQ CLASSES DE RÉPARATION

Cinq types de réparation furent décidés en fonction de l'épaisseur du béton résiduel après l'incendie :

◆ classe 1. Dans toutes les parties où les épaufrures de béton avaient une épaisseur voisine du centimètre, un badigeon de résine à faible viscosité de type Sikafloor 94 fut appliqué à raison de 1 kg/m<sup>2</sup> et ce, après repiquage léger, sablage, et dépoussiérage du support.

◆ classe 2. Dans les zones où la profondeur, des épaufrures du béton se situait entre 1 cm et 7,5 cm, la surface fut sablée après repiquage au marteau léger sur une profondeur d'un centimètre. On appliqua ensuite, par projection en voie sèche un mortier prêt à l'emploi (Lanko 731) sans retrait, fibré, tixotrope à haute adhérence.

Un treillis soudé de 0,9 mm de diamètre, maille 50 mm x 50 mm, traité anticorrosion fut fixé en voûte au revêtement résiduel tous les 0,30 m,

soit par chevillage mécanique lorsque les armatures d'intrados n'étaient pas dégagées, soit par ligatures aux armatures.

◆ classe 3. Sur les petites surfaces (quelques mètres carrés seulement) où l'épaisseur du béton endommagé était supérieure à 7,5 cm et inférieure à 10 cm et où les armatures d'intrados étaient bien dégagées on projeta du béton fibré.

◆ classes 4 et 5. Là où l'érosion du béton était supérieure à 10 cm, les réparations furent effectuées par projection de béton armé de fibres métalliques jusqu'au voisinage des armatures d'intrados ; la dernière couche de 3 à 4 cm étant projetée sans ajout de fibres. Les armatures d'intrados étaient alors conservées et rétablies dans leur position initiale.

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 60 jours de travaux
- 20 jours de préparation dont 15 jours pour le train-travaux (en temps masqué)
- 300 hommes
- 5 700 m<sup>2</sup> de surface à reconstituer
- 1 300 t de béton

au conducteur de travaux assurant la relève dans le tunnel. Le chantier, isolé entre deux portes d'accès distantes de 3 km, était accessible par des véhicules électriques empruntant le tunnel de service. Pour atteindre le lieu du sinistre, il fallait une heure aux cinquante hommes qui se relayaient. Tous étaient invités à porter une grande attention aux contrôles qualité et à la sécurité. Freyssinet a ainsi mis en place une équipe chargée du contrôle externe dont la tâche était de vérifier le bon fonctionnement du contrôle interne ainsi que la qualité des travaux, étape par étape :

- ◆ contrôle de la profondeur de démolition par zone ;
- ◆ contrôle de la résistance du béton sauvegardé ;
- ◆ réception du support avant projection ;
- ◆ contrôle des armatures existantes et des armatures complémentaires ;
- ◆ contrôle des résistances mécaniques des bétons projetés ;
- ◆ contrôle géométrique du béton fini, etc.

Tout le personnel reçut une formation spécifique à la sécurité de la part d'Eurotunnel, complétée par un "accueil sécurité" organisé par Freyssinet. Sur le chantier, un ingénieur sécurité contrôlait en permanence la bonne application des consignes de sécurité (port des équipements obligatoires, nettoyage permanent des voies de circulation) ainsi que le bon fonctionnement des équipements de sécurité (passerelles, garde-corps). C'est au prix de cette logistique et de cette technique que le chantier put être terminé soixante jours après l'entrée du train-travaux dans le tunnel.

## LE CALENDRIER

### 18 - 19 novembre 1996

Incendie dans le tunnel sous la Manche

### 4 décembre 1996

Dans le cadre d'une présélection d'entreprises, Freyssinet est invité à visiter le site et à proposer des solutions de réparation

### 30 décembre 1996

Eurotunnel lance le dossier de consultation, réponse au 6 janvier 1997

### 10 janvier 1997

Freyssinet est déclaré adjudicataire des travaux

### 29 janvier 1997

Le train-travaux entre dans le tunnel

### 28 mars 1997

Les travaux Freyssinet sont terminés

## ENGLISH SUMMARY

### The Channel Tunnel repaired in 60 days

Ph. de Pins, Ph. Zanker, J.-M. Demorieux

The relining of the "Chunnel" consists of precast concrete rings having an inner diameter of 7,60 m and 1,60 m wide, each consisting of six segments including a key segment 0,40 m thick. When a fire occurred on the night of 18 to 19 November 1996 18 km from the entrance on the French side, 300 rings were damaged along a length of 480 m.

The concrete was literally consumed over a thickness of several centimetres, with reinforcements and rails expanding under the heat that reached 1,000 °C. The damage to the southern gallery of the tunnel required exceptional works 90 m under sea level. As the solution consisting in replacing the lining with new segments was ruled out, the company Freyssinet proposed the use of dry-process shotcrete. After a diagnosis established by Setec TPI, a work train was specially equipped by Freyssinet, within the record time of 15 days. After working round the clock, seven days a week, and mobilising almost 300 people, Eurotunnel was proceed with work acceptance operations.

## DEUTSCHES KURZREFERAT

### Reparatur des Ärmelkanal-tunnels in sechzig Tagen

Ph. de Pins, Ph. Zanker, J.-M. Demorieux

Die Auskleidung des Tunnels unter dem Ärmelkanal besteht aus 1,60 m breiten Ringen mit 7,60 m Innendurchmesser aus Fertigbeton mit je sechs Wölbern (davon ein 0,40 m dicker Querwölber). Bei dem schweren Brand in der Nacht vom 18. auf den 19. November 1996 in 18 km Entfernung von dem französischen Terminal wurden über eine Länge von 480 m 300 Ringe beschädigt.

Durch die Hitze von fast 1000 °C wurde der Beton in mehreren Zentimetern Tiefe richtiggehend zerfressen, und die Bewehrungen und Schienen erfuhren eine kräftige Dehnung. Dieser Schadensfall im südlichen Tunnelstollen machte Ausbesserungsarbeiten in 90 m Tiefe unter dem Meeresspiegel erforderlich. Da die Lösung des kompletten Ersatzes der Auskleidung durch neue

Wölber nicht akzeptabel war, hat Freyssinet die Technik des trocken gespritzten Betons vorgeschlagen. Aufgrund einer von Setec TPI erstellten Diagnose hat Freyssinet in einer Rekordzeit von 14 Tagen einen speziellen Bauzug gebaut. Als Abschluß der dreischichtig an sieben Tagen in der Woche mit 300 Beschäftigten durchgezogenen Reparatur konnte Eurotunnel die Arbeiten abnehmen.

## RESUMEN ESPAÑOL

### Reparación en sesenta días del túnel bajo el Canal de la Mancha

Ph. de Pins, Ph. Zanker y J.-M. Demorieux

El revestimiento del túnel bajo el Canal de la Mancha está formado por elementos anulares de 7,60 m de diámetro interior, de hormigón prefabricado de una anchura de 1,60 m, que consta, cada uno de seis dovelas una de las cuales forma clave de cierre, de 0,40 m de espesor. Durante la noche del 18 al 19 de noviembre de 1996, se produjo un incendio a 18 km de la entrada por el lado francés y 300 elementos anulares sufrieron daños sobre una longitud de 480 m.

El hormigón quedó literalmente roído sobre un espesor de varios centímetros, las armaduras y los carriles dilatados bajo el efecto del calor, de cerca de 1000 °C... El siniestro de la galería Sur del túnel ha precisado ejecutar obras excepcionales a 90 m bajo el nivel del mar. La solución consistente en sustituir el revestimiento por nuevas dovelas no fue adoptada y la empresa Freyssinet propuso la técnica del hormigón proyectado por vía seca. Tras un diagnóstico establecido por Setec TPI, fue acondicionado un tren especial por parte de Freyssinet, en un tiempo récord de quince días. La recepción por parte de Eurotunnel de las obras terminadas tuvo lugar al término de tres turnos de ocho horas y siete días por semana, en las cuales participaron cerca de 300 personas.

# La rénovation du tunnel sous Fourvière

## Les travaux de génie civil et du gros œuvre

**Le génie civil du tunnel sous Fourvière fait l'objet de travaux de réparation importants. Ces travaux portent sur le changement de 3200 appareils d'appui de la dalle supportant la chaussée et "coiffant" la galerie d'air frais. La conception originale du tunnel il y a vingt-cinq ans n'avait pas envisagé le recours à ce remplacement. L'article décrit les origines des désordres, le mode de dévolution des travaux et les conditions particulières de ces travaux.**

**M**is en service en 1971, le tunnel sous Fourvière (TSF) a très vite été emprunté par un trafic sans cesse croissant. Depuis vingt-cinq ans, il n'a jamais fait l'objet de travaux d'entretien conséquents portant sur le génie civil.

d'appuis glissants. Les appareils d'appuis latéraux sont positionnés sur des corbeaux ancrés dans les piédroits des tubes et venant sous les nervures latérales de la dalle. La nervure axiale à l'axe de la chaussée repose sur un appareil d'appui mis en œuvre sur un voile central séparant la galerie d'air frais en deux.

### ■ ORIGINE DES DÉSORDRS

En 1994, simultanément aux études qui étaient menées par le Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) pour les équipements, la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) a décidé de confier une mission d'expertise sur le génie civil au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Lyon. Cette inspection détaillée de l'ouvrage a révélé des désordres importants principalement sur les appareils d'appui de la dalle de chaussée du tunnel. En effet, le TSF est constitué de deux tubes de 1850 m environ chacun (figure 1), comportant une galerie d'air frais sous la chaussée et une galerie d'air vicié dans la partie supérieure des tubes (figure 2).

La galerie d'air frais est "coiffée" par une dalle de chaussée continue en béton précontraint de 8,00 m de large et de 850 m de long, soit une demi-longueur de tunnel. Il y a donc deux dalles par tube et quatre dalles pour les deux tubes.

Cette dalle a été construite par plots de 20 m, mis en tension par série de six plots, chaque série étant "couplée" à la suivante de manière à obtenir la continuité de la précontrainte depuis les ancrages actifs, situés aux quatre têtes de tunnel, jusqu'aux extrémités libres des dalles situées au milieu des tubes.

La principale particularité de cette conception, c'est qu'elle doit prendre en compte les mouvements différentiels de la dalle relatifs au phénomène de retrait fluage d'une part et les variations dues au gradient thermique d'autre part. Pour ce faire, la dalle présente dans son profil en travers trois nervures longitudinales qui reposent sur des appareils

**Jacques Mouchon**



CHARGÉ  
DE LA SUBDIVISION  
OUVRAGES D'ART  
Service Grands Projets  
DDE du Rhône à Lyon

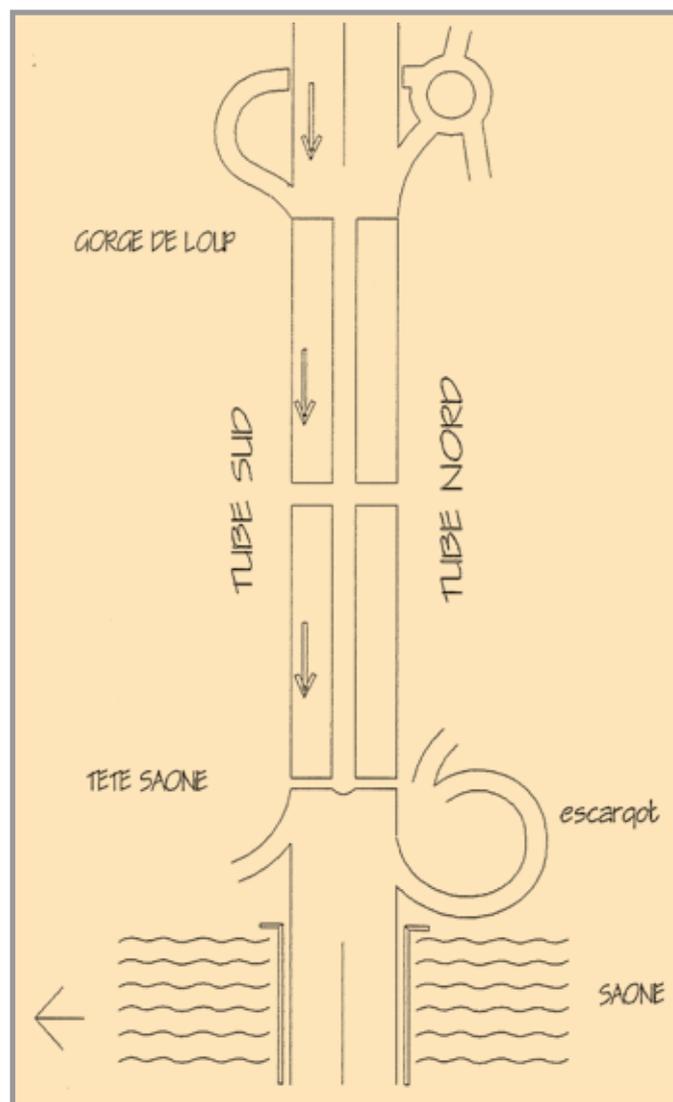
**Roland Chalard**



RESPONSABLE  
DE LA DIVISION  
OPÉRATIONNELLE  
Direction de la Voirie

**Jean-Marc Guetemme**

RESPONSABLE  
DE LA SUBDIVISION TUNNELS  
Direction de la Voirie



**Figure 1**  
Les deux tubes  
constituant le TSF  
*The two tubes making up  
the Fourvière tunnel*



**Photo 1**  
Tunnel sous Fourvière  
*Fourvière tunnel*



**Photo 2**  
Tunnel sous Fourvière, tête Saône  
*Fourvière tunnel, Saône head*



**Photo 3**  
Des équipements usagés  
*Used equipments*



**Photo 4**  
Une alimentation électrique à rénover  
*Electric power supply to be reconditioned*

## RAPPEL DU CONTEXTE

Le tunnel sous Fourvière, mis en service le 8 décembre 1971 après cinq années de travaux, assure deux fonctions essentielles :

- l'écoulement du trafic transitant entre les autoroutes A 6 et A 7,
- la desserte de l'agglomération lyonnaise à partir du secteur ouest.

Composé de deux tubes unidirectionnels (photos 1 et 2), il présente une longueur d'environ 1 850 m. Cet ouvrage a été réalisé sous maîtrise d'ouvrage de la Communauté urbaine de Lyon, le financement étant assuré à 25 % par la Communauté urbaine, 25 % par le département du Rhône et 50 % par l'État.

Une convention, datant de 1976, organise le financement des charges d'exploitation et d'entretien entre l'État (pour la partie génie civil) et la Communauté urbaine (pour les équipements électromécaniques). En 25 ans d'exploitation, le tunnel sous Fourvière n'a jamais fait l'objet de travaux de rénovation. Seul l'entretien courant a été assuré par les services du Grand Lyon et de la DDE, conformément à la convention de gestion. L'observation périodique de l'état des équipements et du génie civil a démontré que

d'importants travaux devaient être entrepris, dont certains très rapidement, pour que l'ouvrage n'entre pas dans une phase de dégradation irréversible.

Un dossier technique, réalisé avec le Centre d'Etude des Tunnels (CETU), et validé par le Grand Lyon et l'État, a chiffré le montant total des travaux de rénovation à 190 millions de francs (MF) TTC, répartis en 40 MF TTC pour le génie civil et 150 MF TTC pour les équipements (travaux et études). Une convention passée entre la Communauté urbaine de Lyon, le Conseil Général du Rhône et l'État prévoit le financement des travaux à parité.

Cette rénovation très importante, réalisée en co-maîtrise d'ouvrage Etat et Grand Lyon est programmée sur 5 ans environ (1996-2001). Ainsi, la DDE assure la maîtrise d'ouvrage des travaux de génie civil et du gros œuvre (ces travaux ont débuté en décembre 1996, et entraînent la fermeture du tunnel dans le sens sud-nord environ 150 nuits par an).

La Communauté urbaine, quant à elle, assurera la maîtrise d'ouvrage de la rénovation des équipements du tunnel. Ces travaux débuteront mi-1998.

**Roland Chalard**

## LA RÉNOVATION DES ÉQUIPEMENTS GÉNÉRAUX ET DE GESTION DU TUNNEL

Après 25 ans d'exploitation et une moyenne actuelle de 100 000 véhicules par jour, il est devenu indispensable de rénover l'ensemble des ouvrages composant le tunnel sous Fourvière, en tenant compte de l'évolution des normes et des règlements. En effet, les conditions ambiantes sont particulièrement sévères, et certains matériels sont devenus obsolètes, ce qui pose des problèmes d'approvisionnement.

Ce projet permettra aussi de doter le tunnel d'équipements de sécurité et d'exploitation complémentaires, et de simplifier l'exploitation et la maintenance des installations, avec la mise en œuvre d'un système de gestion centralisée performant et évolutif. Ainsi, les usagers pourront bénéficier d'un ouvrage neuf, confortable et répondant à toutes les conditions de sécurité. Le programme porte donc sur la rénovation de (photos 3 et 4) :

- ◆ la ventilation mécanique ;
- ◆ l'éclairage ;
- ◆ l'alimentation électrique ;
- ◆ les équipements d'exploitation et de sécurité ;
- ◆ le génie civil lié aux équipements ;
- ◆ le génie civil lié aux piédroits et aux bâtiments ;

◆ la gestion technique centralisée. Certaines contraintes bien particulières doivent être prises en compte :

- ◆ durant la mise en place des nouveaux matériels, la continuité de fonctionnement des équipements existants doit être assurée ;
- ◆ la continuité de fonctionnement de l'autoroute et de la desserte de l'agglomération doit bien entendu être assurée, notamment de jour ;
- ◆ le planning directeur doit être scrupuleusement respecté ;
- ◆ la gestion technique centralisée basée sur un système informatique devra être conçue pour prendre en compte l'exploitation et la maintenance des autres ouvrages souterrains existants ou futurs (tunnel sous la Croix-Rousse, trémie Demonchy, trémie Perrache...);
- ◆ la salle de commande (photo 5) devra accueillir, en plus de cette surveillance d'ouvrages souterrains, au moins la surveillance du contrôle d'accès des zones piétonnes.

Pour mener à bien cette mission, la Communauté urbaine de Lyon est assistée du CETU. Le maître d'œuvre Serete a été désigné, et les travaux devraient démarrer au mois de mai 1998.

**Roland Chalard**





de tous les appuis sur le plot de 20 m centré sur la charpente.

Les vérins latéraux sont placés dans des niches de vérinage construites à l'avancement, les vérins axiaux sont montés sur des HEB en quinconce par rapport au voile central séparatif de la galerie d'air frais. Une hauteur de vérinage maximale de seulement 6 mm suffit pour déposer tous les appuis existants et reposer les appuis neufs.

Les vérins sont pilotés par un ordinateur installé dans un véhicule stationné sur la chaussée, ils sont reliés à une centrale hydraulique elle aussi sur la chaussée. Le soir et le matin en début et fin de poste tout le matériel sur la chaussée est installé puis déposé.

Le cycle de changement des appareils d'appui se déroule actuellement sur quatre nuits :

- ◆ amenée de la charpente sur la zone, vérinage et démolition des appuis existants ;
- ◆ coffrage et coulage des appuis inférieurs latéraux ;
- ◆ mâtage des appuis supérieurs latéraux ;
- ◆ coffrage, coulage et mâtage des appuis inférieurs et supérieurs axiaux.

La cinquième nuit se fait le transfert de charge sur les appuis neufs et la charpente est transférée sur un nouveau site.

Après presque une année de travaux, le chantier avance maintenant avec un cycle en quatre nuits, les hommes et les machines étant maintenant bien rodés.

Au début de l'année, il y a eu quelques problèmes de mise au point de l'outil et d'éducation des ouvriers peu habitués à travailler avec un asservissement informatique et électronique aussi sophistiqué.

Une autre difficulté maintenant maîtrisée s'est présentée à la maîtrise d'œuvre et aussi à l'entreprise, à savoir l'influence de la dilatation de la dalle sur le pré réglage de l'appareil d'appui sur sa plaque de glissement. Il s'agissait d'anticiper au moment du montage en usine le débord de plaque "pratique" à observer le jour de la pose soit quelquefois à 10 ou 15 jours plus tard (compte tenu des week-ends et jours fériés).

Enfin, il faut signaler que parallèlement aux travaux de changement des appuis, le marché prévoit également la réfection du joint longitudinal entre la bordure et la contre-bordure par un système plus performant qu'à l'origine. Spie-Citra a proposé une solution qui a été mise au point et dont la mise en œuvre sur le chantier a démarré depuis l'automne 1997.

### ENGLISH SUMMARY

#### Renovation of the Fourvière tunnel Civil engineering and structural masonry

*R. Chalard, J. Mouchon, J.-M. Guetemme*

The civil engineering for the Fourvière tunnel involved significant repair work. This work included replacement of the 3 200 bearings under the pavement support slab and "covering" the open air gallery. The original design of the tunnel 25 years ago did not provide for this replacement.

The article describes the origin of the trouble, the work phases and the special conditions of the site.

### DEUTSCHES KURZREFERAT

#### Sanierung des Lyoner Fourvière-Tunnels Tief- und Rohbauarbeiten

*R. Chalard, J. Mouchon, J.-M. Guetemme*

Der Tiefbauanteil des Fourvière-Tunnels setzte zunächst umfangreiche Reparaturmaßnahmen voraus, und zwar mußten 3 200 Lager der fahrbahntragenden Platte über dem Frischluftstollen ausgewechselt werden. In der ursprünglichen Auslegung des Tunnels vor 25 Jahren war ein derartiger Austausch nicht vorgesehen.

Der vorliegende Artikel beschreibt die Ursachen der Schäden, den Ablauf der Baumaßnahmen und die besonderen Bedingungen, unter denen die Arbeiten stattfanden.

### RESUMEN ESPAÑOL

#### La renovación del túnel de Fourvière. Obras de ingeniería civil y grandes estructuras

*R. Chalard, J. Mouchon y J.-M. Guetemme*

Las obras civiles del túnel de Fourvière está siendo objeto de importantes obras de reparación. Estas obras comprenden la renovación de 3 200 aparatos de apoyo de la placa que soporta el pavimento y superponiéndose a la galería de aire nuevo. El concepto original del túnel que fue construido hace 25 años, no había contemplado tener que recurrir a esta sustitución.

Se describen en este artículo los orígenes de los desórdenes, el modo de entrega de las obras y las condiciones particulares de estos trabajos.

# Innovation dans le pilotage des tunneliers

## Utilisation d'un gyrocompas sur le chantier de Clichy-la-Briche lot 4

**Patrice Bony**  
DIRECTEUR DE TRAVAUX  
Borie SAE

**Raynald Freant**  
INGÉNIEUR MATÉRIEL  
Borie SAE

**Olivier Gauche**  
INGÉNIEUR GÉOMÈTRE  
Borie SAE

L'utilisation d'un gyrocompas embarqué sur un tunnelier vient d'être expérimentée sur le chantier du lot 4 de l'émissaire de Clichy-la-Briche. Système de guidage très innovant, le gyrocompas n'en est pas moins délicat à mettre en œuvre. Sur ce tracé particulier de chantier, son utilisation s'est avérée toutefois concluante en banalisant totalement par exemple, l'exécution des courbes. C'est ainsi que le dernier tronçon du lot 4 (environ 1 400 m) dont la moitié du tracé était en courbe, a été réalisé à des cadences moyennes les plus élevées du chantier. C'est un système qu'il faut aujourd'hui considérer, tant sur le plan technique qu'économique, lorsqu'on doit faire son choix parmi les différentes solutions de pilotage qui existent.

### ■ LES BESOINS : POURQUOI UN NOUVEAU SYSTÈME DE PILOTAGE

L'ouvrage de liaison Clichy-la-Briche est un émissaire de 2,60 m de diamètre (intérieur voussoirs), dont le creusement s'est achevé en 1997.

Le lot n° 3 avait été réalisé à l'aide d'un tunnelier à pression de terre (Elyette 1) de fabrication FCB par le groupement Borie SAE (mandataire), Chagnaud, Sobéa, Spie Citra, TPI pour le compte du SIAAP (Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne).

Le pilotage du tunnelier avait été assuré sur le lot 3 à l'aide d'un système Zed classique avec rayon laser, cible active et transmission au poste de pilotage des positions machine et des tendances par rapport au laser de référence.

Ce système parfaitement rodé a donné entière satisfaction sur le plan technique mais a mis en évidence deux inconvénients sensibles sur le plan pratique.

#### Difficulté de sauvegarde d'une "fenêtre laser"

Lors de la conception du tunnelier, il avait pu être préservé un gabarit de passage du faisceau laser le long de la machine jusqu'à la cible active Zed située sur le corps avant du bouclier. De dures batailles avaient dû être menées pour conserver une fenêtre de dimension horizontale 15 cm et verticale 40 cm.

Durant toute l'exécution du chantier ce combat avait dû être poursuivi au prix d'arbitrages difficiles compte tenu du faible gabarit de l'ouvrage et de la multiplicité des équipements et réseaux divers sur le back-up de la machine (tout en ménageant le passage du convoi de section 1,25 m x 1,10 m dans un diamètre de 2,60 m).



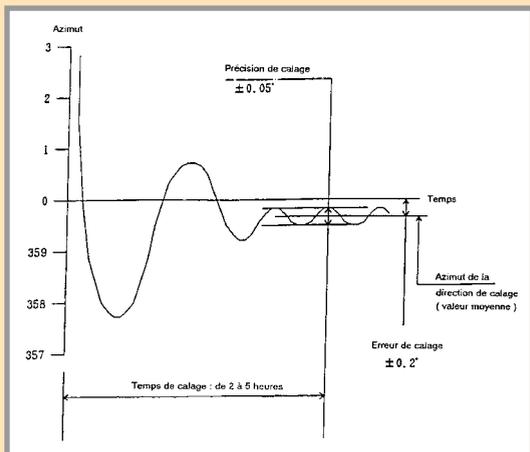
#### Pertes d'avancement en courbe

La faible fenêtre laser sauvegardée pose, en courbe, de gros problèmes de continuité du pilotage. En effet, le faible débattement horizontal possible du laser (largeur fenêtre = 15 cm) fait que celui-ci échappe très vite en courbe. Lors de l'exécution du lot 3, pour des courbes de rayon moyen  $R = 200$  m, le géomètre avait été contraint à des déplacements du laser à des intervalles inférieurs à 10 m. Malgré les astuces logistiques trouvées, le bon rodage des interventions et la bonne volonté de chacun il s'en suivait cependant des arrêts de production à chaque avancée du laser.

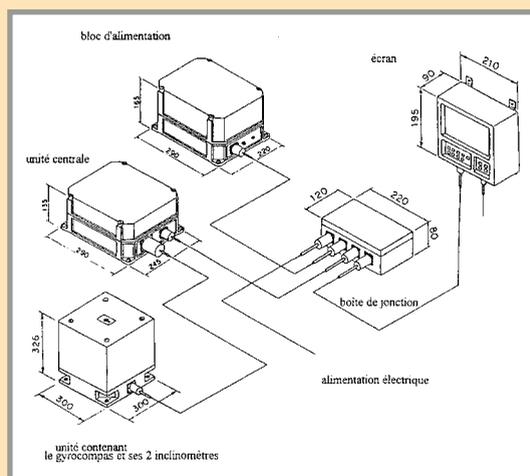
### ■ LOT N° 4 : METTRE EN ŒUVRE UN SYSTÈME INNOVANT

Le groupement d'entreprises ayant été désigné adjudicataire du lot n° 4 avec utilisation d'une version

Vue en plan du tracé  
Plan view of the alignment



**Courbe de calage du gyrocompas**  
**Gyrocompass calibration curve**



**Configuration du sous-ensemble gyrocompas**  
**Configuration of gyrocompass subassembly**

reconditionnée du tunnelier Elyette (Elyette 2), il a pu être tenté d'apporter différentes améliorations aux conditions d'avancement.

Concernant le système de pilotage celles-ci s'avèrent particulièrement nécessaires car plus du tiers des 2900 m du tracé était à réaliser en courbe, soit près d'une centaine de déplacement du laser. Il a donc été décidé de recourir à une solution innovante (sur le plan français) reposant sur l'utilisation d'un gyrocompas embarqué sur le tunnelier. Au-delà du gyrocompas proprement dit, c'est un système complet de pilotage qu'il a fallu créer et mettre au point sur le chantier Clichy-la-Briche lot 4. Ce système associe :

- ◆ un gyrocompas pour la détermination de la direction du bouclier ;
- ◆ deux inclinomètres pour la détermination du tangage et du roulis du bouclier ;
- ◆ un PC de contrôle sur le tunnelier avec écran et clavier déportés ;
- ◆ un système d'altimétrie hydrostatique pour la détermination de l'altitude du bouclier.

Au final, le pilote du tunnelier (et l'ingénieur géomètre dans son bureau) voient, d'une manière graphique et numérique, la position, le roulis, le tangage et le lacet de la machine, actualisés toutes les 12 secondes (plus différents graphiques donnant l'historique ou les tendances du pilotage).

## LE GYROCOMPAS

C'est à la fois le cœur et le "talon d'Achille" du système (fourniture : société Tokimec, Japon). Mécaniquement, le gyrocompas est constitué d'un gyroscope suspendu dans une grosse ampoule de gélatine, elle-même suspendue à une table à ressorts.

Le gyroscope est constitué d'un tore mobile autour d'un axe enchâssé dans un support circulaire double. Si on imprime au tore un mouvement de rotation très rapide autour de son axe, celui-ci paraît décrire un cône de révolution autour d'une droite inclinée dans l'espace. C'est le mouvement de précession bien connu en mécanique : en fait le mouvement observé est dû au mouvement de rotation de la terre, et la seule direction fixe dans ce mouvement est l'axe des pôles. En bloquant verticalement le gyroscope (rôle tenu dans le gyrocompas par la table à ressorts et le fil de suspension du gyroscope dans l'ampoule), on oblige alors le tore à tourner autour d'un axe horizontal : l'axe du tore oscille donc de part et d'autre du méridien géographique, projection de la direction de l'axe des pôles sur le plan horizontal du lieu.

Il suffit alors de mesurer l'angle entre la direction "zéro" de la table à ressorts, et la direction donnée par le gyroscope pour avoir l'azimut exact de la table. En introduisant un offset d'azimut représentant l'angle de la direction "zéro" de la table

à ressorts et de l'axe horizontal du bouclier, on obtient l'azimut géographique du bouclier.

En résumé, tout ceci représente un système extrêmement complexe et fragile, monté sur un bouclier, lieu non recommandé en raison des vibrations et des chocs encourus. C'est la gélatine de l'ampoule qui permet de s'en accommoder lorsque le système est en rotation. A l'arrêt le gyroscope se détériorerait en tapant sur les parois de l'ampoule. C'est une des raisons pour lesquelles on n'arrête jamais le gyrocompas, que ce soit pour un arrêt prolongé ou une intervention hyperbare.

## PRINCIPES DU SYSTÈME

Le PC de contrôle a en mémoire la définition du tracé en plan et du profil en long de l'ouvrage.

De plus, le PC reçoit :

- ◆ les informations du gyrocompas, à savoir :
  - l'azimut du bouclier,
  - le roulis du bouclier,
  - le tangage du bouclier ;
- ◆ les informations de l'altimètre, à savoir :
  - la dénivelée du bouclier par rapport à une référence fixe ;
  - ainsi que toutes les informations transitant par l'automate du tunnelier, parmi lesquelles on utilise, pour le guidage, les allongements de vérins et la pression de poussée totale. Cette dernière est utile pour détecter correctement les changements d'anneau en corrélation avec la variation de l'allongement des vérins, (par exemple pour éviter une incrémentation d'anneau lors d'une manœuvre de rentrée-sortie des vérins en phase d'entretien). Fort de toutes ces informations, le système, à partir d'un point "zéro" donnant la position du tunnelier en XYZ (ou ce qui revient au même en PM, écart horizontal, écart vertical auquel cas le système recalcule un XYZ), peut alors suivre l'évolution du bouclier en XYZ et en PM, écart horizontal, écart vertical.

$$X1 = X0 + \Delta l \times \sin G$$

$\Delta l$  : moyenne des allongements vérins ;

$$Y1 = Y0 + \Delta l \times \cos G$$

G : azimut donné par le gyro ;

En comparant au tracé en mémoire, on obtient le PM, l'écart horizontal et le lacet.

$$Z1 = Z0 + \Delta H$$

$\Delta H$  : dénivelée donnée par l'altimètre.

En comparant au profil en mémoire, on obtient l'écart vertical et le tangage relatif.

## PROBLÈMES À SURMONTER

### La fréquence des mesures

Sur le chantier, le PC de contrôle actualise sa position toutes les 12 s, temps plus que nécessaire pour les différentes connections, les calculs et les

nombreuses ouvertures fermetures de fichiers. Cela représente environ une mesure tous les centimètres d'avancement, ce qui est un peu trop pour calculer au mieux la trajectoire suivie, (trop de calculs sur de très courtes distances nuit), mais cela permet au pilote de suivre, en temps réel, l'attitude du bouclier (roulis, lacet, tangage), et d'enregistrer tout ce qui se passe sur le tunnelier via l'enregistrement de toutes les informations reçues de l'automate (90 infos).

Le PC de surface fait la même chose, ce qui permet de suivre en temps réel le travail effectué sur le tunnelier sans déranger le personnel en poste. Il sert alors de véritable "boîte noire" pour analyses ultérieures. Mais il permet aussi de recalculer la trajectoire suivie en utilisant un point tous les 10 cm environ, ce qui sur une longue distance est mieux qu'un point tous les centimètres.

### La référence fixe de l'altimètre dans la galerie

La référence fixe de l'altimètre doit être changée tous les 100 m, car il ne faut pas oublier qu'elle est reliée au bouclier par un tuyau d'eau, ce qui d'ailleurs peut faire craindre des fuites (avec raison d'après l'expérience sur site).

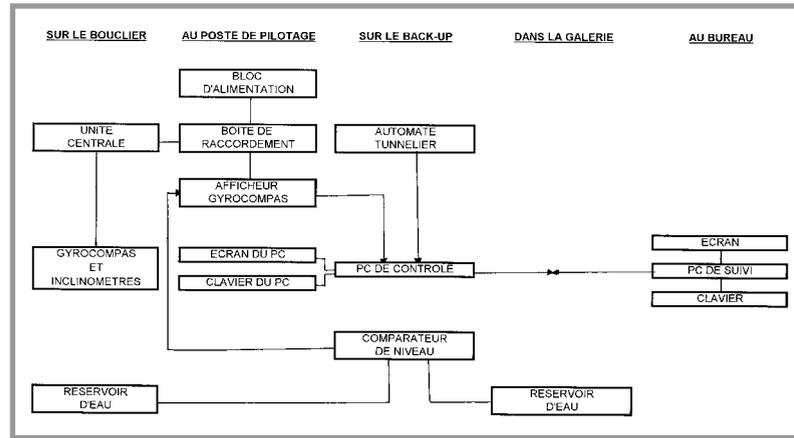
Le PC de contrôle surveille donc la dénivelée  $\Delta H$  de l'altimètre et détecte les variations douteuses. Il affiche alors un message d'avertissement au pilote qui, une fois renseigné, peut conclure à un changement de référence, auquel cas il lui suffit de valider OK, ou à une fuite; dans ce cas, mieux vaut appeler un technicien avec le matériel adéquat pour refaire les niveaux tout en recherchant et réparant la fuite.

### Nécessité de recalages réguliers

Ceux-ci sont nécessaires afin d'éviter une dérive du bouclier (progression réelle non nécessairement confondue avec l'axe de la machine, déplacement "en crabe").

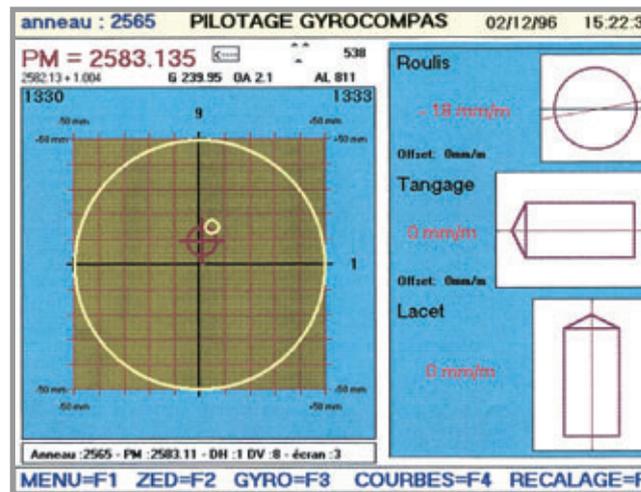
Mais, avec le gyrocompas, les interventions sont bien plus simples et plus rapides, et peuvent donc se faire de jour, sans entraver la bonne marche de la production, puisqu'il n'y a rien à déplacer ou à régler : il suffit de faire une simple visée au théodolite sur un prisme fixé sur le bouclier, et d'en introduire les résultats dans le système de guidage. Quant à la fréquence, une mesure tous les 60 à 80 m est nécessaire, que ce soit en courbe ou en ligne droite, afin de limiter les dérives à 2 cm environ.

En revanche, lors des changements courbe-alignement droit ou alignement droit-courbe, l'expérience montre qu'une mesure juste avant, une mesure 20 m après, puis une mesure de contrôle 30 à 40 m plus loin, permettent de contrôler au mieux la trajectoire du tunnelier (les réglages du système



Synoptique du système de pilotage

Diagram of the guiding system



Données enregistrées lors du pilotage

Data recorded during driving

étant différents suivant la nature des éléments du tracé en plan, il faut plusieurs mesures pour déterminer le nouveau réglage, le réglage adopté pour l'élément de même type déjà décrit par le bouclier n'étant pas forcément le bon).

En ce qui concerne la mesure en altitude du bouclier, l'écart moyen entre la mesure topographique et les indications du système est inférieur à 1 cm.

### CONCLUSION

Compte tenu du pourcentage élevé du tracé à réaliser en courbe, l'utilisation du système de pilotage basé sur le gyrocompas s'est traduit par un gain du temps disponible pour la production.

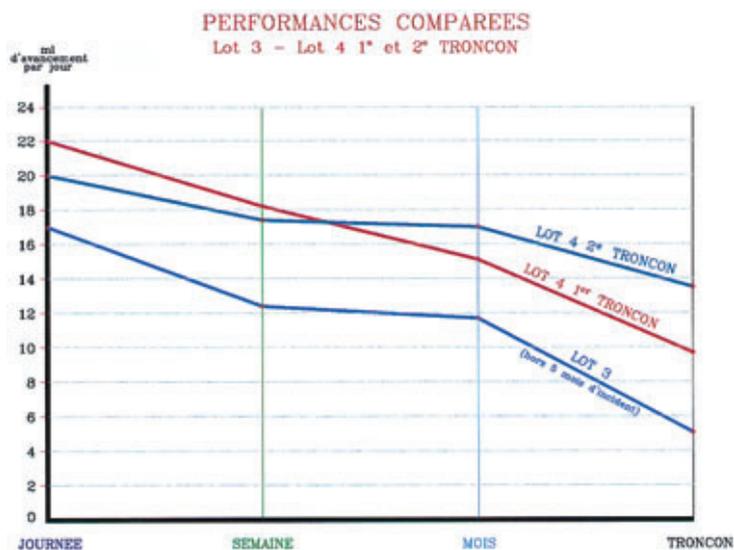
Grâce à la volonté de succès de tous les intervenants du chantier (ingénieur travaux, chef de chantier, pilotes...), le nouveau mode de pilotage a été très rapidement opérationnel et le système Zed utilisé sur le lot 3 qui avait été gardé "en double" a très rapidement été abandonné.

Ce système banalise totalement l'exécution des courbes et permet de reléguer aux oubliettes les réticences d'antan à quitter les alignements droits. Le dernier tronçon du lot 4 (environ 1400 m) dont la moitié du tracé était en courbe a été réalisé à des cadences moyennes les plus élevées du chantier.

Nous avons déjà réfléchi sur le développement de notre système comprenant un théodolite motorisé

à caméra vidéo piloté par le système de guidage lui-même. Ce type d'appareil, tel le Leica TCA, est devenu aujourd'hui plus simple, plus rapide et surtout financièrement raisonnable.

Ainsi, le système deviendrait entièrement autonome en ce qui concerne les recalages périodiques; par exemple on pourrait programmer un recalage tous les jours à la même heure, intéressant lors des arrêts de nuit; on pourrait aussi programmer un recalage lorsque le tunnelier est à l'arrêt (entretien, pause, panne...). Pour ce recalage, il suffit de pouvoir viser un seul prisme sur le tunnelier. C'est ici l'avantage de ce système: alors qu'il faut garder une fenêtre de visée permanente lorsqu'on utilise un laser, ou deux fenêtres permanentes au minimum lorsqu'on utilise un guidage par théodolite seul, la visée de recalage du gyrocompas demande une seule fenêtre de visée dégagée le temps de la mesure, c'est-à-dire 2 minutes pour un appareil automatique.



La visée effectuée par un géomètre demande beaucoup plus de temps et d'allées et venues pour installer le matériel et éclairer les cibles, donc une perturbation du rythme de production plus ou moins importante suivant l'encombrement de l'espace libre sur le tunnelier. Si cette visée de contrôle ne peut être faite (obstacle dans la fenêtre de visée ou autre), l'avancement n'en souffre pas pour autant; un simple message affiché sur l'écran du pilote indique que le recalage n'a pas été possible et qu'il faut prendre les mesures nécessaires pour que le recalage suivant soit validé.

Sans prétendre que le gyrocompas soit la meilleure solution de guidage qui soit il paraît indiscutable que c'est un système qu'il faut aujourd'hui considérer, tant au niveau technique qu'au niveau économique, lorsqu'on doit faire son choix parmi les différentes solutions de pilotage qui existent et qui toutes, ont leurs avantages et leurs inconvénients.

**Performances comparées sur les lots 3 et 4 du chantier**

**Comparative performance on sections 3 and 4 of the project**

## ENGLISH SUMMARY

**Innovation in the control of tunnel boring machines. Use of a gyrocompass on the Clichy-la-Briche site, Section 4**

*P. Bony, R. Freant, O. Gauche*

The use of a gyrocompass on a TBM was recently experimented on Section 4 of the Clichy-la-Briche outfall project. A highly innovative guiding system, the gyrocompass is nevertheless delicate to use. On this particular site, its use was found to be decisive, by completely simplifying the execution of curves, for example. The last part of Section 4 (about 1,400 m), half of which was in a curve, was completed at the highest average working rates of the project. This is a system which must be considered today, from the technical and economic viewpoints, when evaluating the different control solutions available today.

## DEUTSCHES KURZREFERAT

**Innovation bei der Steuerung der Tunnelbaumaschinen Einsatz eines Kreiselssteuergerätes auf dem Baulos 4 Clichy-la-Briche**

*P. Bony, R. Freant, O. Gauche*

Bei den Arbeiten am Baulos 4 des Hauptsammlers von Clichy-la-Briche ist ein auf der Vortriebsmaschine installiertes Kreiselssteuergerät versuchsweise zum Einsatz gekommen. Die Verwendung dieses neuartigen Steuersystems ist recht anspruchsvoll. Bei der hier vorliegenden Streckenführung hat es sich allerdings als äußerst zufriedenstellend erwiesen und - beispielsweise - die Ausführung der Leitungskrümmungen problemlos gestaltet. Der letzte Abschnitt des Bauloses 4 (ca. 1400 Meter), der zur Hälfte kurvenförmig verläuft, konnte so mit den höchsten mittleren Taktzeiten der gesamten Baumaßnahme ausgeführt werden.

Ein Kreiselssteuersystem gehört heute vom technischen wie vom wirtschaftlichen Standpunkt her zu den Lösungen, die bei einer Entscheidung zwischen den verschiedenen Steuersystemen in die engere Wahl genommen werden können.

## RESUMEN ESPAÑOL

**Innovación para el control de los tuneleros Utilización de un girocompás en las obras de Clichy-la-Briche, lote 4**

*P. Bony, R. Freant y O. Gauche*

Se acaba de experimentar la utilización de un girocompás en un tunelero, en las obras del lote 4 del emisario de Clichy-la-Briche. El girocompás es un sistema de guiado muy innovador, pero cuya implementación resulta sumamente delicada. No obstante, su empleo ha demostrado ser perfectamente concluyente, al banalizar, por ejemplo, la ejecución de las curvas. En el trazado particular de estas obras, por ejemplo, el último tramo del lote 4 (unos 1400 m) cuya mitad del trazado está formada por curvas, se ha realizado con ritmos de trabajo de promedio más elevados que en los demás puntos de la obra.

Se trata de un sistema que será preciso tener debidamente en cuenta, tanto desde el punto de vista técnico, como económico, cuando es preciso adoptar la solución más adecuada para el control de los tuneleros.