

# Travaux

n° 794

## TRAVAUX SOUTERRAINS

- Galeries de sécurité du tunnel du Somport
- Nouvelle liaison ferroviaire transalpine Lyon-Turin
- Santa Augusta. Infrastructures souterraines pour une nouvelle carrière de cimenterie
- Collecteur du Cheval noir à Pantin
- Un microtunnel entre sable et roche
  - Le lot Arge-Ferden du projet Alp Transit
- La traversée sous-fluviale de la Warnow à Rostock (Allemagne)
- Les tunnels d'El Azhar au Caire

## OUVRAGES D'ART

- Le viaduc de Millau
- Rcade nord de Béziers. Le nouveau pont sur l'Orb
- Le viaduc de Jaulny. LGV Est européenne
- Le viaduc de l'Anguienne

Travaux  
souterrains  
Ouvrages d'art

# Sommaire

**Travaux**  
numéro 794

février 2003

Travaux souterrains - Ouvrages d'art



Notre couverture

Le tunnel  
du Somport

© DDE 64

**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 18 11 41  
Fax : (33) 02 41 18 11 51  
Francoise.Godart@wanadoo.fr

**VENTES ET ABONNEMENTS**

Olivier Schaffer  
9, rue Magellan - 75008 Paris  
Tél. : (33) 01 40 73 80 05  
revuetravaux@wanadoo.fr  
  
France (11 numéros) : 163 € TTC  
Etranger (11 numéros) : 200 €  
Etudiants (11 numéros) : 56 €  
Prix du numéro : 20 € (+ frais de port)

**MAQUETTE**

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

**PUBLICITÉ**

Régie Publicité Industrielle  
Isabelle Duflos  
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).

**Editions Science et Industrie S.A.**

3, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n° 0106 T 80259

## éditorial

Daniel Tardy

1

## actualités

6

techniques  
et matériaux

11

## matériels

13

**PRÉFACE**

Robert Longelin

15

**TRAVAUX SOUTERRAINS**

◆ Galeries de sécurité du tunnel du Somport. Galeries d'interconnexion entre les tunnels routier et ferroviaire  
- *Safety galleries in Somport Tunnel. Interconnecting galleries between the road and rail tunnels*

P. Voron

16

◆ Nouvelle liaison ferroviaire transalpine Lyon-Turin. La descenderie et galerie de reconnaissance de Modane/Villarodin-Bourget  
- *New transalpine rail link Lyons-Turin. The decline and reconnaissance gallery of Modane/Villarodin-Bourget tunnel*

P. Vignat

24

◆ Santa Augusta. Infrastructures souterraines pour une nouvelle carrière de cimenterie  
- *Santa Augusta. Underground infrastructure for a new cement plant quarry*

G. Pétard, G. Vertut, P. Rolandetti, B. Lasnes

29

◆ Le collecteur du Cheval noir à Pantin  
- *Cheval Noir main sewer in Pantin*

P. Sol

34

◆ Un microtunnel entre sable et roche  
- *A microtunnel between sand and rock*

J. Aubry

36

◆ Le lot Arge-Ferden du projet Alp Transit. Un bi-tube de 11,6 km creusé à l'explosif



# Sommaire

février 2003

Travaux souterrains - Ouvrages d'art

Dans les prochains numéros

- Routes
- Recherche et innovation
- Terrassements
- Sols et fondations
- Environnement
- Travaux urbains
- Réhabilitation d'ouvrages
- International
- Ponts



- *The Arge-Ferden work section of the Alp-Transit project. A double-tube tunnel 11.6 km long with tunnelling by explosives*  
**Y. Chamberlin, Ch. Hénault**

38



◆ La traversée sous-fluviale de la Warnow à Rostock (Allemagne)  
 - *The under-river crossing of the Warnow at Rostock, Germany*  
**Divers auteurs**

44



◆ Les tunnels d'El Azhar. Une nouvelle génération de tunnels routiers  
 - *The El Azhar tunnels. A new generation of road tunnels*  
**Divers auteurs**

51



### OUVRAGES D'ART

◆ Le viaduc de Millau  
 - *The Millau viaduct*  
**J.-P. Martin, M. Buonomo, Cl. Servant**

61



◆ Rocade nord de Béziers. Le nouveau pont sur l'Orb  
 - *Béziers northern ring road. The new bridge over the Orb*  
**Divers auteurs**

69



◆ Concours de conception réalisation pour le viaduc de Jaulny. LGV Est européenne  
 - *Design and Build competitive bidding for the Jaulny viaduct. East European High-Speed Train Line*  
**P. Charlon**

79



◆ Viaduc de l'Anguienne. Conception d'un ouvrage atypique  
 - *L'Anguienne viaduct. Design of an atypical structure*  
**Y. Maury**

85

**ABONNEMENT TRAVAUX**

répertoire des fournisseurs

91

Encart après p. 48

### INDEX DES ANNONCEURS

ATC BTP .....	7	KELLER FONDATIONS SPÉCIALES .....	12
ATLAS COPCO FORAGE .....		LANCY-MIXJET .....	2
ET DÉMOLITION .....	2È DE COUVERTURE	NOBEL EXPLOSIFS .....	2
CAP .....	4È DE COUVERTURE	RICHARD DUCROS .....	11
CNETP .....	8	SIMECSOL EEG .....	4 ET 27
GETEC .....	13	SOLETANCHE BACHY .....	4
IDETEC .....	23	SOTRES .....	23
IHC FRANCE .....	27	WEBER .....	10

Le présent numéro de la revue *Travaux* devait être entièrement consacré aux travaux souterrains et comporter comme il se doit, une série d'exposés concernant des chantiers récemment terminés ou en cours de réalisation.

Vous remarquerez que d'autres sujets ont aussi été traités. Cette faiblesse de communication est bien sûr due à la période de crise subie par notre spécialité, crise qui dure depuis plusieurs années, même si les chiffres d'affaires des deux dernières se sont stabilisés, mais à un niveau bien trop bas.

Il serait bien sûr souhaitable de connaître les raisons de cette crise et dans la mesure du possible de rechercher les moyens d'en atténuer les conséquences dommageables.

Dans la préface de la revue *Travaux* de février 2002, je faisais l'historique de l'activité de notre spécialité pendant nos "trente glorieuses", c'est-à-dire entre 1965 et 1995.

Je rappelle que nous sommes partis vers 1965 avec pour seule technique valable l'air comprimé et l'explosif ou le marteau-piqueur. En trente années, nous avons pu rapidement intégrer dans nos propositions commerciales les nouvelles techniques de creusement, surtout en site urbain, comportant des modes opératoires nouveaux et surtout de nouvelles machines puissantes et révolutionnaires, associées à des dispositions innovantes dans tous les domaines. Nos performances ont alors atteint celles des meilleures entreprises mondiales et ont parfois dépassé nos espérances.

Il existe des preuves diverses de ces succès professionnels, ne serait-ce que le constat de nos records de chiffre d'affaires à l'exportation, ces dernières années, en Europe et dans le reste du monde, reconnaissant ainsi notre compétence.

J'ai pour ma part reçu, début 2002, une importante délégation chinoise composée de dix-sept personnalités représentant chacune une région et fortement préoccupées par les travaux souterrains de leurs provinces d'environ 40 millions d'habitants. Cette délégation avait pour mission de s'informer quant à la valeur des technicités des entreprises européennes. Elle devait en rentrant, rapporter et informer le gouvernement central pour définir des stratégies futures à l'échelon national.

Toujours dans ce contexte, j'ai reçu, début 2003, une série d'informations concernant en particulier la création de lignes de métro dans trois grandes cités chinoises et concouramment le souhait de pouvoir espérer le concours des entreprises françaises. Bien sûr, tout ceci mérite d'être éclairé, mais c'est encore une preuve de la compétence reconnue de nos entreprises. On peut affirmer, sans être taxé d'autosatisfaction, que nous avons socialement et techniquement rempli notre part de contrat en nous plaçant au meilleur niveau des performances internationales. A part de la subir, nos entreprises peuvent ne pas se sentir responsables de la crise actuelle et il faut en rechercher ailleurs les causes.

Il est vrai que l'adéquation entre la puissance de création d'ouvrages par les entreprises et les décisions de démarrage effectif des projets est rarement possible. Les entreprises ont appris à s'adapter mais cette adaptation est de plus en plus difficile du fait du niveau croissant des performances qui diminuent les délais d'exécution. Cette amélioration considérable des performances a en effet pour conséquence, soit une augmentation significative du chiffre d'affaires de l'entreprise, soit une diminution accessoire des moyens y compris des effectifs, d'où l'agressivité des Français à l'exportation.

On peut rappeler que les progrès réalisés pendant nos "trente glorieuses", surtout dans la première demi-période, l'ont été grâce à une collaboration exemplaire entre les donneurs d'ordre et les entreprises. Ces progrès ont nécessité des investissements conséquents et acceptés, mais les acteurs responsables de l'époque ont su trouver des consensus pour que soient atteints les objectifs définis surtout quant aux coûts, aux délais et à la sécurité.

Il m'arrive de souhaiter de mieux connaître le coût total réel des contentieux actuels comportant les dépenses internes des donneurs d'ordre et celles des entreprises auxquelles il faut ajouter les dépenses externes dues aux cabinets juridiques et d'expertises... Ces contentieux sont devenus monnaie courante. Dans son organisation, une entreprise doit les prévoir et y consacrer une part importante de son énergie. N'est-il pas souhaitable d'espérer revenir à cette collaboration du passé dans l'intérêt évident des deux parties, le recours au contentieux devant redevenir l'exception.

On voit que des actions doivent être menées par nos organisations professionnelles pour retrouver cette collaboration passée, ou s'en rapprocher,

afin de résoudre un bon nombre de problèmes posés et de citer la mise en œuvre du nouveau Code des marchés publics, l'élimination des OAB (offres anormalement basses), les appels d'offres systématiquement forfaitisés dans notre spécialité, la bonne définition des délais de paiement, certaines dispositions anormales figurant dans les cahiers des charges des contrats...

La commission des marchés de la FNTP a beaucoup travaillé pour aboutir à des accords en vue de l'application correcte des articles du nouveau Code des marchés publics, mais ses efforts ne sont pas toujours directement suivis d'effets et il faut revenir à nouveau auprès des ministères concernés ou des entreprises publiques ou para-publiques.

Au cours des réunions syndicales professionnelles, les entreprises déplorent la mauvaise qualité actuelle des relations avec quelques responsables directs inconscients ou trop zélés des entreprises publiques ou assimilées. Il s'agit de comportements suffisants et de prises de position regrettables ou unilatérales.

Nous souhaitons revenir à des relations

comportant le respect de l'autre et nous allons nous employer à mettre en œuvre les moyens d'y parvenir.

L'Association française des travaux en souterrain, l'AFTES, s'emploie de son côté à créer un nouveau groupe de travail composé de représentants des maîtres d'ouvrage et des entreprises pour envisager de faire paraître, en 2003 nous l'espérons, des recommandations incluant en particulier la nature des relations souhaitées entre les différents partenaires des contrats de travaux.

On redira que tous ces problèmes évoqués ajoutent de nouvelles difficultés à nos entreprises. Nous pouvons bien sûr pendant quelque temps vivre sur l'acquis du passé mais pour tenir notre place, chèrement acquise, dans la compétition européenne et internationale future, nous devons conserver l'esprit d'entreprendre, d'innover et de disposer des moyens d'y parvenir.

Il est bien évident que le pays ne peut pas se passer de notre spécialité. Il y aura toujours à réaliser des ouvrages souterrains routiers, ferroviaires, d'assainissement, de stockage et bien d'autres.

Leur construction dans les meilleures conditions de sécurité, de pénibilité, de coût et de délai et de respect de l'environnement, pour l'essentiel, doit une fois encore, être accompagnée par une collaboration éclairée des partenaires.



■ ROBERT LONGELIN

Président du Syndicat Professionnel des Entrepreneurs de Travaux Souterrains de France

# Galeries de sécurité du Galerias d'interconnexion entre

La construction du tunnel routier du Somport a eu lieu principalement avant les incendies dramatiques du Mont-Blanc en mars 1999 et celui du Tauern en mai 1999. Les réflexions sur la sécurité dans les tunnels routiers ont débouché sur les recommandations de la circulaire 2063 d'août 2000 et conduit à la création du CESTR.

La commission mixte franco-espagnole de sécurité a décidé de mettre en application ces recommandations par le biais d'aménagements supplémentaires.

A terme dix-sept galeries, dont six en France, viendront relier le tunnel routier au tunnel ferroviaire son voisin.

Cet article décrit les trois premiers ouvrages réalisés côté français et leur mode de construction dans un environnement d'ouvrages non en service mais particulièrement sensibles.

## LE CONTEXTE

Cette opération s'inscrit dans le cadre de l'amélioration entre la France et l'Espagne de la liaison Pau - Saragosse. Elle concerne l'aménagement de la RN 134 entre Pau et le col du Somport. Le tunnel routier international du Somport de 8608 m de long, dont 2858 m en France, constitue l'ouvrage essentiel de cet aménagement en extrémité sud. L'entrée en France est située aux Forges d'Abel et la sortie sud, en Espagne à Canfranc (figure 1). Les principaux travaux d'équipement d'exploitation et de sécurité (alimentation électrique, éclairage, ventilation, réseau de lutte contre l'incendie, équipement des niches et refuges, etc.) et les travaux de chaussée à l'intérieur du tunnel ont été achevés sur les 2848 m de la partie française fin 1999.

Les incendies dramatiques survenus dans le tunnel sous le Mont-Blanc en mars 1999 puis dans le tunnel du Tauern en mai 1999 ont connu un retentissement mondial. Ils ont conduit les différents Etats européens à rechercher une optimisation des conditions de sécurité dans les principaux tunnels routiers ou ferroviaires qu'ils soient en service ou en construction.

Le Comité d'évaluation de la sécurité des tunnels routiers (CESTR) mis en place à la suite de l'incendie du tunnel du Mont-Blanc a émis en juillet 1999, des recommandations conduisant à des amé-

nagements supplémentaires, visant à renforcer la sécurité dans le tunnel du Somport. Les réflexions conduites dans cette optique au niveau français et relayées par la commission technique mixte franco-espagnole ont permis de donner une suite favorable aux recommandations émises par le CESTR. Les aménagements supplémentaires sont décrits dans le dossier d'avant-projet pour mise en sécurité du tunnel du Somport, approuvé par décision ministérielle du 11 août 2000. Ils consistent à renforcer la capacité de désenfumage, à construire un local d'accueil des moyens de secours à la tête française, et surtout à créer des galeries de raccordement à un tunnel ferroviaire voisin.

Dans le concept général de sécurité routière, le tunnel ferroviaire actuellement fermé à la circulation a été considéré comme une intéressante galerie de sécurité parallèle au tunnel routier : il constitue un cheminement sûr et protégé du feu pour l'accès des secours et l'évacuation des usagers se trouvant dans les refuges piétons du tunnel routier.

## PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS OUVRAGES

### La RN 134

Au cœur du Pays béarnais la RN 134 assure la liaison entre la France et l'Espagne, à partir de Pau par le col du Somport et depuis le 17 janvier 2003 cette liaison emprunte le tunnel du Somport. La modernisation de sa partie nord entre Pau et Oloron-Sainte-Marie est déjà ancienne avec la création de créneaux de dépassement dans les secteurs les plus pentus. Entre Oloron-Sainte-Marie et le Somport, l'aménagement rendu difficile par la coexistence en fond d'une vallée étroite de la route, de la voie ferrée et du gave d'Aspe, laisse encore subsister à ce jour de nombreux secteurs rétrécis.

### Le tunnel ferroviaire du Somport

C'est un tunnel rectiligne (photo 1) à voie unique. Il fut construit entre 1904 et 1909 et mis en service en 1923 après une période d'interruption en raison de la guerre. La ligne ferroviaire Pau - Canfranc, sur laquelle est situé ce tunnel, est hors service depuis 1970 suite à un déraillement accidentel. Ce tunnel transfrontalier, long de 7875 m, part

Figure 1  
Plan de situation  
Location map



# tunnel du Somport

## les tunnels routier et ferroviaire

d'une altitude de 1 075 m côté français pour arriver à 1 197 m en gare de Canfranc après avoir culminé à 1 207 m.

Actuellement c'est un ouvrage en très bon état, maçonné avec des parpaings en béton. Il présente la particularité d'avoir une forte rampe de 3,4 % sur la moitié nord (France).

### Le tunnel routier du Somport

Le tunnel routier du Somport est un ouvrage trans-frontalier franco-espagnol de 8 608 m de long dont 2 858 m en France (photo 2).

Les travaux préparatoires démarrés en 1990 par la création d'une route d'accès à la tête française se sont terminés en 1993.

Le creusement du tunnel a démarré en 1994 et s'est achevé côté français en 1998. Les travaux d'équipement d'exploitation, de ventilation et de sécurité ont été réalisés en 1999 ainsi que les travaux de chaussée à l'intérieur du tunnel.

A cette même date le creusement du tunnel côté espagnol était encore en cours.

Le tunnel routier, contrairement au tunnel ferroviaire, n'est pas rectiligne et longe ce dernier sur toute sa longueur. La distance qui sépare les deux tunnels varie globalement de 150 à 350 m dans la partie française.

Le tunnel est constitué d'un tube unique, dans lequel la circulation sera bidirectionnelle sur deux voies de 3,50 m séparées par une bande médiane non circulaire de 1,35 m de large.

La chaussée d'une largeur entre trottoirs de 9,00 m dégage un gabarit de 4,50 m de haut (figure 2 et photo 2).

Les 2 858 m de la partie française du tunnel routier sont dotés des ouvrages de sécurité suivants :

- ◆ des niches sécurité, implantées tous les 200 m, côté ouest (voie France → Espagne) ;
- ◆ des niches incendie, implantées tous les 200 m, côté Est (voie Espagne → France) ;
- ◆ trois galeries de retournement situées aux PM 898, 1810 et 2712 ;
- ◆ un garage longitudinal au PM 2162.
- ◆ trois refuges piétons aux PM 931, 1788 et 2723.

Ces trois refuges piétons existants sont séparés par une interdistance de l'ordre de 900 m (ils seront raccordés à l'issue des travaux aux galeries d'interconnexion).

Pour respecter la circulaire ministérielle française n° 2063 du 25 août 2000 qui demande, à terme, une issue d'évacuation des piétons tous les 400 m, il est apparu souhaitable de construire les amorces

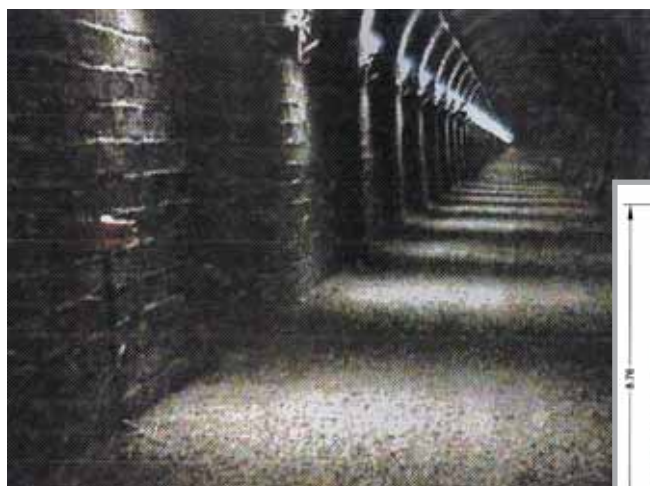


Photo 1  
Le tunnel  
ferroviaire  
*The rail tunnel*

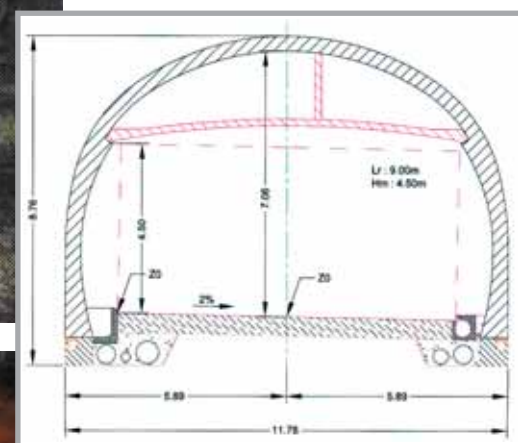


Figure 2  
Profil type  
du tunnel routier  
*Typical profile  
of the road tunnel*

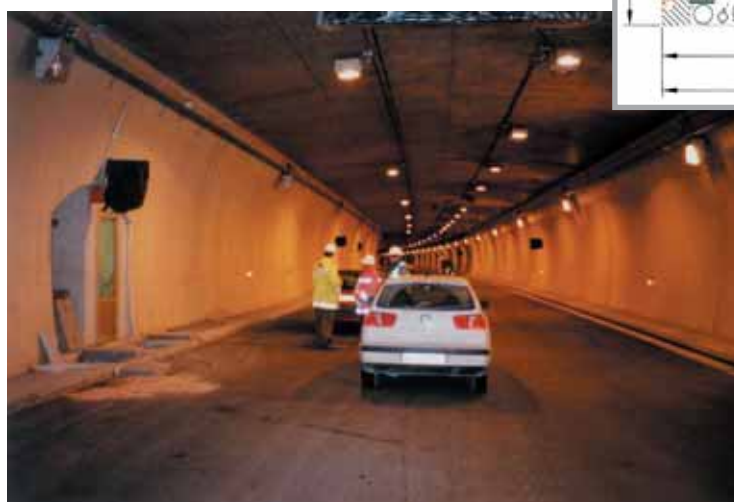


Photo 2  
Le tunnel  
routier  
*The road tunnel*

des trois futures galeries supplémentaires à partir du tunnel routier et avant sa mise en service.

### LE CREUSEMENT DES GALERIES D'INTERCONNEXION

La DDE 64 a confié à Scetauroute DTTS en 2001 une mission d'assistance à maîtrise d'œuvre pour le suivi de réalisation des travaux d'excavation et d'équipement des trois premières galeries. Cette mission démarrée en octobre 2001 s'est terminée fin juillet 2002.

### Le marché de travaux

Le marché passé entre l'Etat (DDE 64) et le groupement Razel-Sotrabas, à l'issue d'une consultation, concerne des travaux comprenant le génie civil et les équipements de trois galeries d'intercon-

Photo 3  
Démolition des maçonneries  
du tunnel ferroviaire  
*Demolition of rail tunnel  
masonries*



Plage de fréquence du signal	Vitesse de vibration
F < 10 Hz	5 mm/sec
10 Hz < F < 250 Hz	20 mm/sec
F > 250 Hz	50 mm/sec

Tableau I  
Les seuils  
de vibration  
*Vibration  
thresholds*

Photo 4  
Un élargissement  
dans le tunnel ferroviaire  
*Widening  
in the rail tunnel*

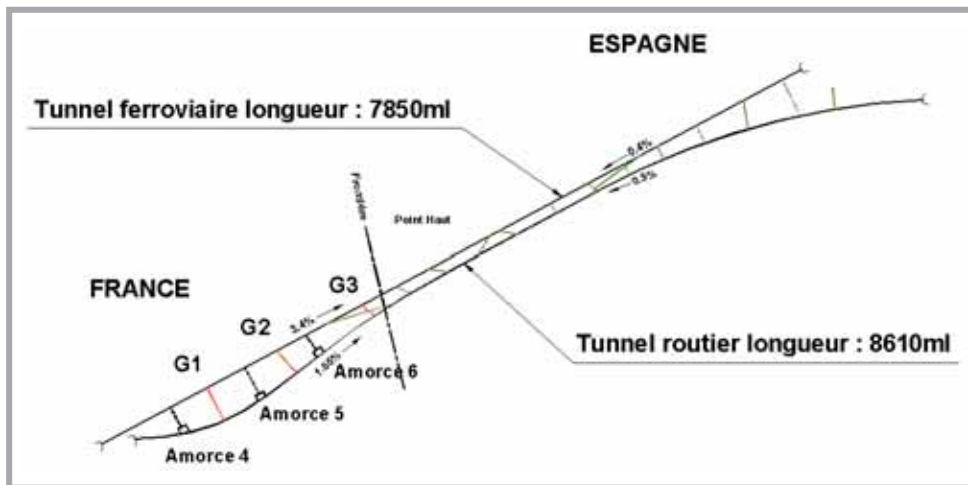


Figure 3  
Vue en plan des différents  
ouvrages en France  
et en Espagne

*Plan view of the various  
structures in France  
and Spain*



nexion reliant les trois refuges piétons du tunnel routier au tunnel ferroviaire.

A terme, ces galeries doivent permettre aux services de sécurité, en cas de besoin, d'accéder directement en certains points du tunnel routier en utilisant le tunnel ferroviaire contigu.

Les travaux comportent également :

- ◆ le remblaiement du tunnel ferroviaire ;
- ◆ la mise en dépôt des marins.

Le marché contient une tranche ferme pour l'exécution des galeries G1 et G2 situées respectivement au PM 1215 et au PM 1980 par rapport à l'entrée du tunnel ferroviaire et une tranche conditionnelle pour l'exécution de la galerie G3 située au PM 2950.

Les montants respectifs sont de 4 millions d'euros

HT pour la tranche ferme, 0,9 million d'euros pour la tranche conditionnelle soit un total de 4,9 millions d'euros HT.

## Le délai d'exécution

L'ordre de service notifiant le démarrage de la tranche ferme a été émis le 15 juillet 2001 et celui de la tranche conditionnelle en octobre 2001, avec un délai global d'exécution de 10,5 mois. Ce qui sous-entend un achèvement total des travaux pour début juin 2002 incluant une période de préparation de 2 mois.

Outre les installations extérieures propres au chantier, les installations à l'intérieur du tunnel ferroviaire comprennent le remblai, avec géotextile anti contaminant, sur la voie ferrée existante, pour permettre la circulation des engins de chantier en phase travaux et des secours en phase exploitation.

## Les contraintes générales du chantier

Outre le délai restreint d'exécution et les impératifs spécifiques liés aux travaux souterrains en site sensible (respect de l'environnement, rejets d'eau, usage de l'explosif...) les principales contraintes d'exécution sont :

- ◆ limitation à l'usage des explosifs au voisinage des maçonneries de l'ouvrage ferroviaire et des plafonds et cloisons du tunnel routier ;
- ◆ le creusement simultané des trois galeries avec les interférences liées au phasage d'exécution (marinage) et la ventilation ;
- ◆ l'obligation de réaliser les travaux en empruntant uniquement le tunnel ferroviaire, sans possibilité d'accès par le tunnel routier. Deux véhicules légers se croisent tout juste. Les demi-tours doivent se faire dans des ouvrages spécifiques réalisés pour les besoins du chantier (élargissement, galeries de retournement, garage) ;
- ◆ les grandes distances qui séparent la tête du tunnel ferroviaire des attaques souterraines et entre les attaques elles-mêmes. Ces distances génèrent des délais de transport nécessitant une anticipation des activités et du phasage.

## La géologie

La géologie du site est composée essentiellement de trois types de roches : calcaire, grès et culm (schistes et pellites). Un pourcentage variable dans la composition de ces roches – ajouté à un terrain fortement tectonisé – rend leur identification difficile.

Les volées tirées dans l'élargissement du tunnel ferroviaire au droit de la galerie G1 montrent des formations calcaire-gréseuses veinées de calcite et entrecoupées de formations schistosées détritiques très fines (pellites).

La stratification générale des couches, telle que constatée au droit de l'élargissement du tunnel ferroviaire de la galerie G1 a une orientation N 30 ° - 30 ° E.

Une schistosité plus ou moins prononcée ainsi qu'une fracturation complexe donnent à ces terrains une tenue moyenne à l'excavation.

Les terrains rencontrés lors de l'excavation de G1 sont composés essentiellement de calcaire et de culm ; les hors profils sont plus importants que sur les autres galeries ; la pose de sept cintres sur une dizaine de mètres a été nécessaire. Les terrains rencontrés pour l'excavation de G2 sont plus de type calcaire-gréseux avec quelques passages de culm. Ceux de la galerie G3 sont à forte majorité de grès "inter-lités" dans des bancs calcaires.

Aucune arrivée d'eau notable n'a été détectée lors de l'excavation des trois galeries.

### Les élargissements dans le tunnel ferroviaire

#### *Les restrictions à l'usage des explosifs pour le tunnel ferroviaire*

Les critères de vibration imposés par la SNCF (tableau I) ont été globalement respectés lors des tirs des excavations des galeries.

Trois séries de tirs d'essais ont été réalisées par le CETU dans le tunnel routier au droit de chaque galerie à l'issue de la période de préparation.

Après examen de ces tirs le CETU a retenu les lois d'amortissement suivantes :

◆ G1  $V = 5,9 (D/\sqrt{Q})^{-2}$

◆ G2  $V = 4 (D/\sqrt{Q})^{-2,34}$

◆ G3  $V = 2,8 (D/\sqrt{Q})^{-2}$

Le CETU a proposé, pour les tirs de production d'élargissement et d'entrée en galerie d'interconnexion de retenir une charge unitaire instantanée maximale de 1 350 g et d'un délai de départ entre charges au bouchon d'au moins 50 ms.

Les premiers tirs de production de l'élargissement de G1 ont servi de tirs de référence.

#### *Démolition des maçonneries du tunnel ferroviaire (photo 3)*

Le choix du groupement, explicité dans son offre technique, de réaliser le creusement avec des installations spécifiques pour chacune des galeries d'une part, et de maintenir la continuité du tunnel ferroviaire pour l'exécution simultanée des autres galeries d'autre part, l'a contraint à réaliser localement des surexcavations ou élargissement du tunnel ferroviaire.

Ces élargissements consistent à porter de 4,5 m à 9 m la distance entre piédroits du tunnel ferroviaire, sur une longueur de 24 m, afin de pouvoir installer pour chaque galerie un transformateur de 300 kVA, un compresseur d'air comprimé, une pompe associée à un surpresseur à eau, un ventilateur de 55 kVA en soufflage dans la galerie. La réali-

sation de ces ouvrages conduit à doubler localement la section du tunnel ferroviaire passant de 22 m<sup>2</sup> à 40 m<sup>2</sup> (photo 4).

Préalablement à l'abattage, des profilés métalliques cintrés U140 ont été boulonnés en voûte de part et d'autre des élargissements afin de conforter la voûte constituée de parpaings en béton pas toujours bloqués au rocher.

L'élargissement de G3 a pu être minimisé puisque l'entreprise a pu stocker son matériel spécifique en amont dans le tunnel ferroviaire, la circulation d'engins dans cette partie étant limitée aux véhicules d'entretien et non de production. De ce fait la démolition de la voûte maçonnée a pu se faire de façon mécanique, alors que les démolitions des élargissements de G1 et G2 ont nécessité l'emploi d'explosifs afin d'abattre le rocher au-delà des maçonneries.

Une galerie de retournement ou galerie de stockage de 15 m de long, opposée, perpendiculaire au tunnel ferroviaire a également été exécutée dans les élargissements de G1 et G2.

Tout le mois de décembre 2001 a été nécessaire pour réaliser l'élargissement de G1, celui de G2, commencé en janvier, a pu se faire simultanément avec le début du creusement de la galerie G1 et a duré trois semaines.



Photo 5  
Galerie zone  
de croisement  
et retournement  
*Gallery in passing  
and turnaround zone*

### Les galeries d'interconnexion

#### *Description des ouvrages*

Il s'agit de la réalisation de trois galeries (figure 3) reliant le tunnel ferroviaire au refuge piétons existant du tunnel routier. Ces galeries sont exclusivement dédiées au secours. Le tunnel ferroviaire et les galeries doivent être rendus accessibles aux véhicules des services de secours (3,5 x 3,5). Les véhicules d'intervention (type VSAB) peuvent ainsi approcher les secouristes à proximité des refuges piétons existants.

Des aménagements spécifiques ont également été réalisés dans les galeries : zone de croisement, galerie de retournement (photo 5), radier en béton, éclairage, pose de portes.



Galeries	Longueur	dont zone garage/alésage	Galeries de retournement	Galeries piétonne	Pente du TF à TR
G1	354 m	20 m garage	12 m + 7 m	0 m	+ 4.8 %
G2	275 m	20 m garage	12 m + 7 m	22 m	+ 0.2 %
G3	136 m	46 m alésage	10 m	0 m	- 13.8 %

**Tableau II**  
Caractéristiques de chaque galerie  
*Characteristics of each gallery*

Plage de fréquence du signal	Vitesse de vibration seuil maximal	Vitesse de vibration seuil absolu
F < 20 Hz	5 mm/sec	8 mm/sec
20 Hz < F < 50 Hz	8 mm/sec	12 mm/sec
50 Hz < F < 150 Hz	20 mm/sec	30 mm/sec
150 Hz < F < 250 Hz	50 mm/sec	75 mm/sec

**Tableau III**  
Critères de vibration pour le tunnel routier  
*Vibration criteria for the road tunnel*

**Photo 6**  
Galerie en section courante  
*Gallery in link section*



Le profil en travers type des galeries dégage un gabarit de 3,50 m en largeur par 3,50 m en hauteur. Sa section est de l'ordre de 20 m<sup>2</sup>. Le tableau II donne les caractéristiques de chaque galerie. Le refuge piétons n° 2 fait également office de local technique souterrain (transformateur et équipement électromécanique sensible en fond de refuge) ce qui a nécessité la réalisation d'une galerie piétonne pour accéder latéralement au refuge. Ces galeries ne sont pas revêtues d'un béton coffré mais uniquement d'un béton projeté non fibré (photos 5 et 6). Le tracé de la galerie G3 interceptait une galerie de service réalisée au tunnelier par les Espagnols d'une part et avoisinait d'autre part une galerie réalisée par Razel à partir du refuge n° 3 pour des commodités de chantier.

#### *L'excavation à l'explosif*

Le creusement des trois galeries a été réalisé à l'explosif et uniquement à partir du tunnel ferroviaire. La convention passée entre RFF et la DDE 64 contient l'obligation de limiter les vibrations dues aux tirs.

Tous les tirs ont été contrôlés avec enregistrement des valeurs crête à l'aide de deux capteurs de vitesse de vibrations tridirectionnels.

Les 60 premiers mètres d'excavation des trois galeries ont nécessité l'utilisation de tirs séquentiels. La longueur des premières volées a été limitée à

1,0 m puis augmentée par tranche de 0,5 m jusqu'à des volées maximales de 3,20 m.

A la fin des excavations des galeries G1 et G2 et à l'approche des ouvrages du tunnel routier, les contraintes de vibration sont réapparues, les volées ont été ramenées à 1,0 m. Les critères de vibration (tableau III) qui devaient être respectés pour les tunnels routiers et les refuges sont plus contraignants que ceux du tunnel ferroviaire.

Les difficultés pour obtenir les autorisations (Drire) pour le surconditionnement des charges n'ont pas facilité le démarrage des travaux d'excavation à l'explosif.

C'est un total de 20000 m<sup>3</sup> de matériaux en place qui a dû être excavé et mis en dépôt sur les différents sites des forges d'Abel.

#### *La ventilation*

Le système de ventilation mis en place par le groupement repose sur une dilution des gaz d'échappement et des fumées de tirs, par création d'un courant d'air le long du tunnel ferroviaire.

Un ventilateur de 200 kVA (60 m<sup>3</sup>/s) assure le soufflage en aspirant de l'air dans la partie espagnole du tunnel ferroviaire et l'insuffle en direction de la tête française. Ce ventilateur à débit manuellement variable a été positionné au PM 3030 près de la frontière.

Un masque réalise l'étanchéité entre le ventilateur et le tunnel ferroviaire mais comporte une porte réservant le passage pour un véhicule de secours.

Trois ventilateurs soufflants, positionnés successivement dans les élargissements au droit des galeries assurent un apport d'air frais à chaque attaque (55 kVA débit environ 20 m<sup>3</sup>/s).

Une difficulté supplémentaire est survenue dès le mois d'avril lorsque les Espagnols ont voulu démarrer le creusement des six autres galeries sur leur territoire. Dès lors ils ont installé dans le tunnel ferroviaire symétriquement à la frontière le même ventilateur pouvant leur assurer un apport d'air France - Espagne.

Entre les deux ventilateurs une galerie d'interconnexion entre le tunnel ferroviaire et routier assure l'apport d'air venant du tunnel routier. Bien qu'à cette période les activités (polluantes) dans le tunnel routier étaient réduites, ce système de ventilation restait préoccupant.

Durant cette période (avril - juillet), grâce à la bonne concertation entre les intervenants espagnols et français, il ne fut constaté aucune anomalie ni dysfonctionnement majeur du système d'apport d'air frais.

#### *La foration*

Un boomer Atlas Copco équipé de deux glissières de 3,5 m assura la foration des volées. Chaque volée (photo 7) est tracée à front et comprend en moyenne 70 trous dont 34 trous correspondant au découpage des parois et du radier. La longueur des

volées variait de 1,0 à 3,5 m ; cette longueur était fonction soit de la qualité des terrains traversés, soit directement liée aux vibrations lorsque les tirs se déroulaient à proximité d'ouvrages sensibles. Un deuxième boomer Atlas Copco équipé d'une glissière de 4,5 m a été nécessaire lors d'activités simultanées sur les trois galeries à partir du mois de mars 2002. La pente de 13,5 % dans la galerie G3 a rendu l'activité de foration plus délicate.

### Le marinage

Le groupement Razel-Sotrabas a sous-traité à l'entreprise espagnole "Alertrans" les opérations de marinage et de purge. Les moyens mis en œuvre étaient de type routier ; un chargeur CAT 950 assurait le chargement des camions routiers (6 x 4) d'une capacité de 10 m<sup>3</sup>. Les cycles de marinage étaient très variables et dépendaient essentiellement du temps du chargeur à effectuer sa marche arrière avant de vider sa charge, le retournement de ce matériel étant impossible en section courante galerie.

Le cycle moyen observé variait de 3 à 5 heures. La purge était effectuée, dès le marinage terminé, à l'aide d'un tractopelle CAT 438 équipé d'un BRH. Le temps de la purge du front et des parements était d'une heure.

En accord avec le maître d'œuvre, l'entreprise réalisa une galerie supplémentaire de retournement au droit des zones de croisement situé au milieu des galeries G1 et G2 pour diminuer le temps de marinage. Outre le temps gagné, cela permettait aussi de libérer les élargissements et de faciliter la circulation dans le tunnel ferroviaire.

### Le soutènement

Trois profils type de soutènement étaient prévus au marché (figure 4) :

- ◆ profil type 1 : 10 cm de béton projeté fibré, 3 cm de béton projeté non fibré, cinq boulons d'ancrage de 3 m de long en HA Ø 32 scellés au mortier ;
- ◆ profil type 2 : 20 cm de béton projeté fibré, 3 cm de béton projeté non fibré, sept boulons d'ancrage de 3 m de long en HA Ø 32 scellés au mortier ;
- ◆ profil type 3 : cintres HEB de 140 associés à



Photo 7  
Foration  
de la volée  
*Drilling  
the blasting  
holes*



Photo 8  
Béton projeté  
*Shotcrete*

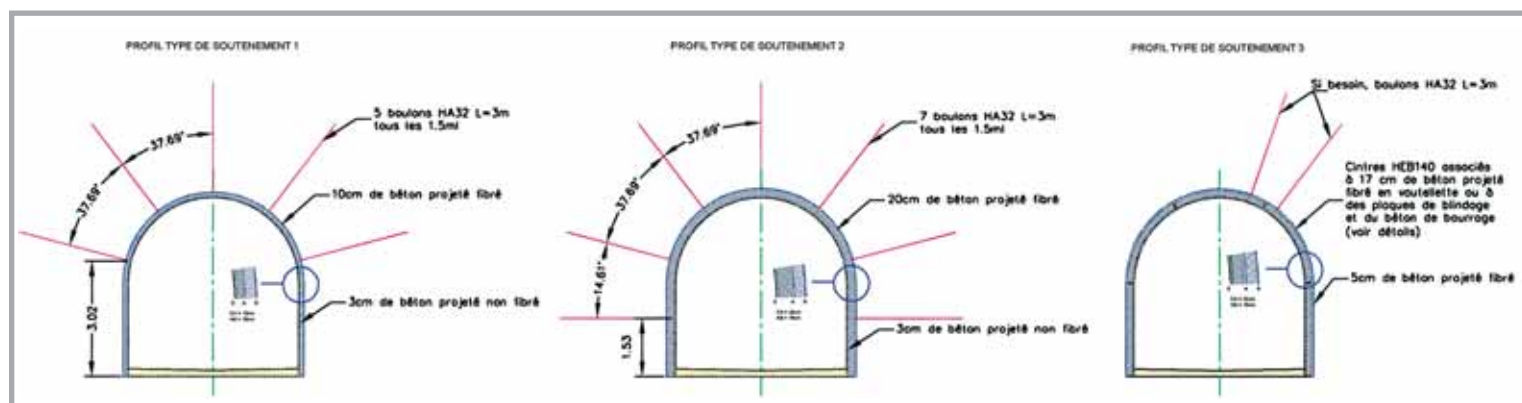
14 cm de béton projeté fibré, 3 cm de béton projeté non fibré en recouvrement des cintres.

Le profil type 3 était prévu sur une dizaine de mètres au démarrage des galeries à partir du tunnel ferroviaire. L'entreprise proposa un profil type 2 renforcé s'adaptant mieux aux chanfreins d'intersection entre les galeries et le tunnel ferroviaire.

Six silos Mauer, installés sur un quai de chargement au niveau des installations de chantier assuraient l'alimentation en béton projeté. Une cuve à eau chaude permettait la fabrication d'un béton chaud par tout temps. Le béton était acheminé à chaque front à l'aide de trois engins malaxeur Dieci de 5 m<sup>3</sup> de capacité. La mise en œuvre se faisait à l'aide d'un robot à béton projeté Spraymec 914 WP d'un débit de 10 m<sup>3</sup>/h (photo 8).

A chaque volée le soutènement avec une première couche de 5 cm de béton projeté fibré et les boulons correspondant au profil type était mis en place. Le soutènement définitif était réalisé en arrière et

Figure 4  
Profils types  
de soutènement  
*Typical support  
profiles*



le plus souvent en temps masqué. Un total de 2 500 m<sup>3</sup> de béton projeté aura été mis en œuvre pour le soutènement définitif des galeries et ouvrages de sécurité.

Près de 4 000 boulons HA Ø 32 scellés au mortier Quick-mix ont été mis en œuvre le plus souvent à l'aide d'une nacelle "Normet" (photo 9).

### Les délais

Un dérapage de deux mois apparaît sur le planning initial d'exécution de l'entreprise qui prévoyait une date d'achèvement et de repli des installations de chantier pour début juin 2002 ; l'entreprise termina tous les travaux d'excavation, réalisation d'un béton de radier dans les trois galeries et la pose des équipements électriques et des portes de secours fin juillet 2002. Comme prévu dans son offre, elle exécuta les travaux d'excavation en six mois.

Mais un démarrage des installations au 15 juillet et la difficulté d'appréhender le temps de réalisation des élargissements peuvent expliquer ce retard.

De plus, pendant les travaux de creusement des galeries le groupement Razel-Sotrabas s'est vu confier par l'Etat, sous couvert de la DDE 64, un deuxième marché relatif à la construction des trois amorces de 12 m de long à partir du tunnel routier dans la perspective de construction ultérieure de trois autres issues de secours.

## CONCLUSION

L'Espagne avait déjà aménagé six galeries d'accès pour les secours.

Elle a, dès le mois d'avril 2002, entrepris le creusement de sept autres galeries d'interconnexion. A l'heure actuelle cinq sont pratiquement achevées.

Comme la France a terminé la réalisation des trois premières galeries d'interconnexion débouchant dans les refuges piétons du tunnel routier et s'apprête à réaliser les trois prochaines galeries débouchant dans le tunnel routier par le biais d'un sas, c'est donc à terme, un complexe de dix-sept galeries de sécurité qui reliera les tunnels routier et ferroviaire du Somport.

Photo 9  
Boulonnage  
Rock bolting



## ABSTRACT

Safety galleries in Somport Tunnel  
Interconnecting galleries between the road and rail tunnels

P. Voron

The Somport road tunnel was mostly constructed before the dramatic fires in Mont-Blanc Tunnel in March 1999 and in the Tauern in May 1999. The review of safety in road tunnels led to the recommendations of circular No. 2063 of August 2000 and the setting up of the CESTR.

This French-Spanish joint safety commission decided to put these recommendations into effect through additional improvement works.

Eventually 17 galleries, including six in France, will connect the road tunnel to its neighbouring rail tunnel.

This article describes the first three structures constructed on the French side and their construction technique in an environment of structures not in service but extremely sensitive.

## RESUMEN ESPAÑOL

Galerías de seguridad del túnel del Somport  
Galerías de interconexión entre los túneles viario y ferroviario

P. Voron

La construcción del túnel viario del Somport tuvo lugar, principalmente, antes de los dramáticos incendios del túnel del Mont Blanc, en marzo de 1999 y el de Tauern, en mayo del mismo año. Las reflexiones acerca de la seguridad en los túneles viarios han tenido como resultado las recomendaciones plasmadas en la circular 2063 de agosto de 2000, habiendo dado lugar a la creación del CESTR.

La comisión mixta hispano-francesa de seguridad tomó la decisión de poner en aplicación estas recomendaciones introduciendo ciertos acondicionamientos suplementarios.

Una vez terminado este proyecto, diecisiete galerías, de las cuales seis en Francia, permitirán poner en comunicación el túnel viario con el túnel adyacente de tipo ferroviario.

En el presente artículo se describen las tres primeras estructuras ejecutadas por el extremo francés y su modo de construcción en un entorno de estructuras no en servicio pero sí particularmente sensibles.

# Nouvelle liaison ferroviaire La descenderie et galerie de Villarodin-Bourget

La nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin traversera le massif des Alpes et nécessitera donc le percement de plusieurs tunnels dont le plus important est le tunnel dit de base de 52,6 km, ouvrage bitube dans sa version définitive, permettant la circulation des TGV, des trains de fret et des trains transportant des poids lourds.

Conformément au Sommet du 29 janvier 2001, suivi d'un traité, les gouvernements français et italien ont décidé d'engager un programme 2001-2006 d'études d'avant-projet et de reconnaissance par galeries pour le tunnel de base.

Les travaux de la descenderie et galerie de reconnaissance de Modane/Villarodin-Bourget ont commencé.

**F**ranchir les obstacles, favoriser la libre circulation des hommes et des marchandises, améliorer les relations sur le continent européen, tout en favorisant le rééquilibrage du trafic marchandises de la route vers le rail, tels sont les enjeux de la future liaison Lyon - Turin.

De Londres à Milan, de Madrid à Amsterdam, le paysage ferroviaire européen se modernise. La liaison Lyon - Turin, située au croisement des axes Europe du Sud/Europe du Nord et Europe de l'Ouest/Europe de l'Est, sera un maillon clé de ce réseau moderne.

Le projet Lyon - Turin comporte trois sections destinées à la fois au trafic marchandises et voyageurs : la section française, confiée à Réseau Ferré de France (RFF), la section internationale confiée à LTF et la section italienne confiée à Rete Ferroviaria Italiana (RFI). Les trois entités travaillent en étroite coopération.

Pour la section internationale, les gouvernements français et italien ont signé un accord, le 29 janvier 2001, conduisant à un traité international. Par cet accord, ils s'engagent à réaliser la section internationale de la liaison Lyon - Turin avec un tunnel principal reliant Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie) à Venaus (Val de Suse), long de 52,6 km. Cet ouvrage, composé dans sa version définitive, de deux tubes parallèles permettra la circulation des trains de fret mais aussi des trains transportant des poids lourds ("autoroute ferroviaire") et des TGV.

L'accord du 29 janvier 2001 prévoit deux étapes distinctes. Dans un premier temps, la société Lyon Turin Ferroviaire (LTF) est chargée d'effectuer sous l'autorité de la commission intergouvernementale des études d'avant-projet et des travaux de reconnaissance pour que les gouvernements décident, dans une seconde phase, des modalités de réalisation du tunnel international.

Concernant les travaux de reconnaissance de la première phase, LTF engage progressivement le creusement des descenderies de Modane/Villarodin-Bourget, Saint-Martin-la-Porte, la Praz et de la galerie de Venaus (photo 1).

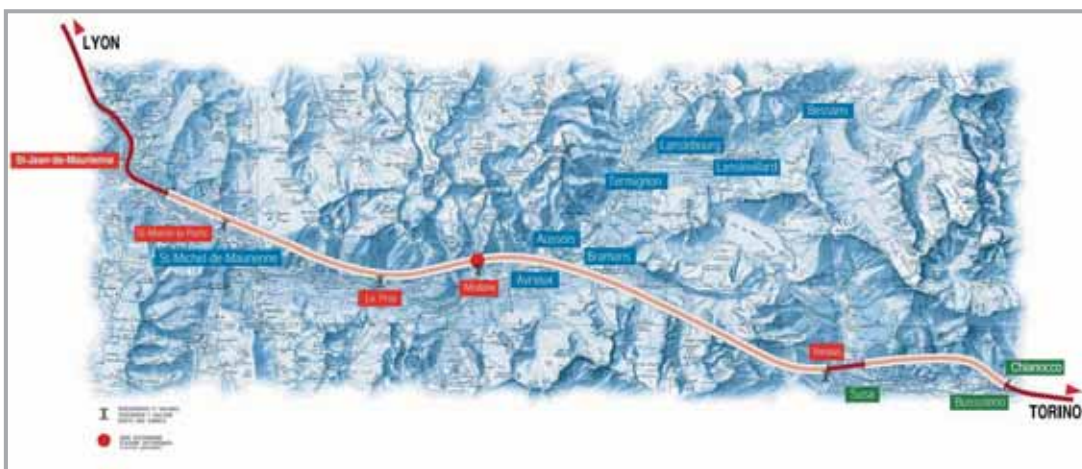


Photo 1  
Le tunnel international entre Saint-Jean-de-Maurienne et Venaus

*The international tunnel between Saint-Jean-de-Maurienne and Venaus*

## ■ CADRE GÉNÉRAL DE L'OPÉRATION

Le programme comprend quatre secteurs de reconnaissance par galeries pour le tunnel de base.

- ◆ trois en territoire français : Saint-Martin-la-Porte, la Praz et Modane ;
- ◆ un en territoire italien : Venaus.

La réalisation des galeries a pour but d'appréhender les conditions d'exécution des futurs ouvrages et de consolider les estimations en coût et délai du projet.

Les ouvrages ainsi réalisés serviront à la construction du futur tunnel de base (attaque intermédiaire, accès routier, ventilation, espaces techniques ou de sécurité) et seront intégrés dans le fonctionnement du futur ouvrage (photo 2).

A ce jour seule l'opération de Modane a débuté. Il s'agit de la réalisation d'une descenderie de 4 000 m de longueur environ, de 65 à 81 m<sup>2</sup> de section excavée (constituant le lot 1 en tranche ferme du marché en cours).

Le profil en long est composé d'une légère rampe de l'ordre de 1 % sur environ 900 m suivie d'une pente de 12 % sur 2 900 m prolongée par une légère rampe de 0,3 % sur 200 m pour rejoindre l'axe et le niveau du futur projet.



Photo 2  
Plan de situation de la descenderie et galerie de reconnaissance de Modane/Villarodin-Bourget

*Location drawing of the decline and reconnaissance gallery of Modane/Villarodin-Bourget tunnel*

# transalpine Lyon-Turin reconnaissance de Modane/

Pierre Vignat

DIRECTEUR ADJOINT  
CONSTRUCTION  
Lyon Turin Ferroviaire



Ensuite seront attaquées à partir du pied de la descenderie, les galeries de reconnaissance de 28 à 37 m<sup>2</sup> de section (constituant le lot 2) :

- ◆ vers l'est sur 2050 m (tranche conditionnelle) ;
- ◆ vers l'ouest sur 450 m (tranche conditionnelle) prolongée éventuellement de 450 m (tranche optionnelle).

Des ouvrages annexes sont prévus pour assurer d'une part la collecte et l'exhaure (albraque et chambres de reprises) des eaux pompées, d'autre part les essais et mesures *in situ* nécessaires à la compréhension du massif (photo 3).

Dans le cadre des travaux, les matériaux issus de l'excavation sont triés en vue de leur valorisation. Les matériaux sont concassés pour leur utilisation comme agrégats dans la fabrication des bétons projetés et coulés (soutènement, radier, etc.) nécessaires aux travaux. Les matériaux non réutilisés seront mis en dépôt définitif (photo 4).

## ■ CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA DESCENDERIE DE MODANE

La descenderie devrait recouper dans sa partie ascendante une majorité de quartzites, assez fracturés, pouvant drainer des eaux superficielles, jusqu'à la rencontre d'un accident (aquifère?) souligné par des cargneules.

Puis, dans la partie descendante, les terrains rencontrés seront des micaschistes. Dans la seconde moitié de la descenderie, ces micaschistes sont associés à un aquifère profond, caractérisé par une famille de fractures contenant des eaux fortement minéralisées, sous forte pression mais de faible débit.

La plus grande partie de ces matériaux sera réutilisée dans le cadre de la valorisation des déblais.

## ■ MÉTHODES CONSTRUCTIVES

L'excavation est prévue en pleine section par abatage à l'explosif.

Le soutènement va d'une simple couche de béton projeté fibré associé à des boulons, à plusieurs épaisseurs de béton projeté renforcé de cintres légers TH, voire des cintres lourds HEB et du béton coulé (photo 5).

Aussi en descenderie et en galerie on trouve quatre profils, selon les classes d'excavation I à V définies dans la norme suisse SIA 198 "Travaux sou-



Photo 3  
Entrée de la descenderie de Modane. Au premier plan, la rivière l'Arc et le bassin de décantation

*Entrance of the Modane decline. In the foreground, the Arc River and the settling pond*



Photo 4  
Vue générale des installations de valorisation des matériaux de déblais

*General view of the excavation material beneficiation installations*



Photo 5  
Descenderie de Modane : boulonnage

*Modane decline : rock bolting*

terrains", plus un profil en zone de gonflement et un profil en zone d'accidents géologiques.

Le marinage est réalisé grâce à une bande transporteuse (800 mm, débit 250 t/h minimum).

Dans la partie descendante de la descenderie seront réalisées des chambres de reprises d'eau dans lesquelles sont installées les pompes nécessaires à la remontée des eaux par paliers de 50 m de dénivelé : débit prévu de 300 l/s pour la descende-

rie auquel s'ajoutera 150 l/s pour les galeries. Les installations d'exhaure sont calculées avec un coefficient de sécurité de 2.

Une reconnaissance à l'avancement systématique est faite au front par un forage destructif de 50 à 90 m avec un recouvrement entre deux séries de forages.

Les têtes de forage sont équipées de sas pouvant garantir un fonctionnement jusqu'à une pression d'eau de 10 MPa et de capteurs (gaz-eau). Outre l'enregistrement des paramètres de foration, des diagraphies différées seront réalisées systématiquement :

- ◆ radioactivité naturelle (*gamma ray*) ;
- ◆ températures ;
- ◆ sonique champ total (*full wave sonic*).

Cette reconnaissance sert à :

- ◆ définir les formations valorisables ;
- ◆ repérer les difficultés géologiques, venues d'eau, accidents, venues de gaz ;
- ◆ anticiper sur le choix du profil type et la définition des traitements de terrain éventuellement nécessaires (drainage-injection).

Au besoin des forages complémentaires en destructif ou carottés sont envisagés.

Les travaux se déroulent sur 16 postes du lundi 6 heures au samedi 14 heures, la période du week-end étant réservée aux travaux d'aménagements connexes et à la reconnaissance à l'avancement. Pour les 400 premiers mètres étant implantés sous le village de Villarodin-Bourget, les tirs de nuit sont interdits.

### CALENDRIER

L'ordre de service a été donné le 22 avril 2002, les trois premiers mois ont servi aux études et installations de chantier.

La durée des travaux est de 30 mois pour la descendrière et de 19 mois pour les galeries, auxquels s'ajoutent 2 mois pour le repli des installations.

Au 1<sup>er</sup> décembre 2002, 320 m étaient réalisés. L'ensemble des installations est mis en place, en particulier celles pour la valorisation des déblais et la confection des bétons ; celles relatives au marinage par bandes transporteuses est en cours.

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### *Maître d'ouvrage*

Lyon Turin Ferroviaire SAS

##### *Maître d'œuvre*

- ITM groupement E.G.G. Simecsol (mandataire)
- Ingénierie SNCF
- Bonnard et Gardel
- Sea Consulting

##### *Entreprises*

- Groupement Eiffage TP (mandataire)
- Societa italiana Per Condotte d'Acqua Spa
- Granulats Rhône Alpes

#### ABSTRACT

New transalpine rail link Lyons-Turin. The decline and reconnaissance gallery of Modane/Villarodin-Bourget tunnel

*P. Vignat*

**The new Lyons-Turin rail link will pass through the French Alps and will therefore require drilling several tunnels, the largest of which is the so-called base tunnel 52.6 km long, a double-tube structure in its definitive version, accepting high-speed train traffic, freight trains and trains transporting commercial vehicles.**

**In accordance with the treaty following on from the Summit of 29 January 2001, the French and Italian governments have decided to undertake a research programme from 2001 to 2006, involving initial design and reconnaissance by galleries for the base tunnel.**

**Work has begun on the decline and reconnaissance gallery of Modane/Villarodin-Bourget tunnel.**

#### RESUMEN ESPAÑOL

Nuevo enlace ferroviario transalpino Lyon-Turín. El plano inclinado y galería de reconocimiento de Modane/Villarodin-Bourget

*P. Vignat*

**El nuevo enlace ferroviario Lyon-Turín habrá de atravesar el macizo de los Alpes y, por consiguiente, habrá de precisar la ejecución de varios túneles, siendo el más importante el túnel denominado "básico", de 52,6 km, con estructura bitubo en su versión definitiva, que permitirá la circulación de los trenes de alta velocidad (TGV), los trenes de cargas y los trenes dedicados al transporte de camiones pesados.**

**De conformidad con la Cumbre del 29 de enero de 2001, seguida de un tratado, los gobiernos francés e italiano decidieron emprender un programa 2001-2006 de estudios de anteproyecto y de reconocimiento por galerías para el túnel básico.**

**Ya se han emprendido las obras del plano inclinado y de la galería de reconocimiento de Modane/Villarodin-Bourget.**

# Santa Augusta

## Infrastructures souterraines pour une nouvelle carrière de cimenterie

En 2004 la nouvelle carrière de Santa Augusta sera capable de fournir les 650 000 t/an de calcaire à la cimenterie Vicat de La Grave dans les Alpes-Maritimes.

Le mode d'exploitation par la méthode dite de "la dent creuse" retenue dans un souci fort de respect de l'environnement, nécessite d'importantes infrastructures souterraines représentant un investissement conséquent.

Le groupement des entreprises Spie/SBTPCI et Campenon Bernard Méditerranée titulaire du marché des creusements a réalisé les travaux en 2002, et présente dans cet article les principaux choix pour les méthodes et moyens mis en œuvre ainsi que les performances enregistrées.

**Gérard Pétard**  
PRÉSIDENT DIRECTEUR GÉNÉRAL  
Spie Batignolles TPCI

**Gérard Vertut**  
DIRECTEUR OPÉRATIONNEL  
Spie Batignolles TPCI

**Patrick Rolandetti**  
DIRECTEUR D'EXPLOITATION  
Spie Batignolles TPCI

**Bernard Lasnes**  
DIRECTEUR DE CHANTIER  
Spie Batignolles TPCI

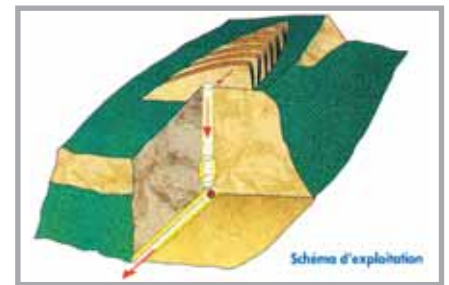


Figure 1  
Schéma dent creuse  
Hollow bit diagram

### LE PROJET

L'usine Vicat de La Grave est implantée depuis 1923 dans la vallée du Paillon, et pour assurer la continuité de l'approvisionnement en calcaire, recherche à proximité un gisement exploitable représentant des réserves pour un siècle. Dans ce cadre, le massif de Santa Augusta offre des perspectives intéressantes malgré des difficultés d'accès et un habitat très dispersé, mais bien présent, deux des caractéristiques d'un milieu sensible.

Le projet d'ouverture d'une nouvelle carrière a pris en compte très tôt les contraintes environnementales, et la préservation du paysage en particulier. La méthode d'exploitation en "dent creuse", innovante dans le domaine des carrières, constitue une réponse au problème posé. Elle permet de conserver les falaises du "Baou" de Santa Augusta, qui formeront ainsi un écran. Il n'y aura pas d'incidence sur le trafic routier : les matériaux transiteront par un puits, seront concassés dans une salle souterraine, puis évacués par un transporteur à bande, souterrain sur une grande partie du tracé, jusqu'à la carrière des Clues (figure 1).

Cette alternative à l'option classique d'exploitation en "gradins" de la carrière des Clues nécessite une infrastructure souterraine importante composée des ouvrages portés sur les schémas suivants soit :

- ◆ galerie d'accès ;
- ◆ galerie technique ;
- ◆ recoupe de construction ;
- ◆ chambre de réception des matériaux ;
- ◆ silo de stockage matériaux ;
- ◆ zone d'installation concasseur ;
- ◆ puits de jet des matériaux (figures 2, 3 et 4).

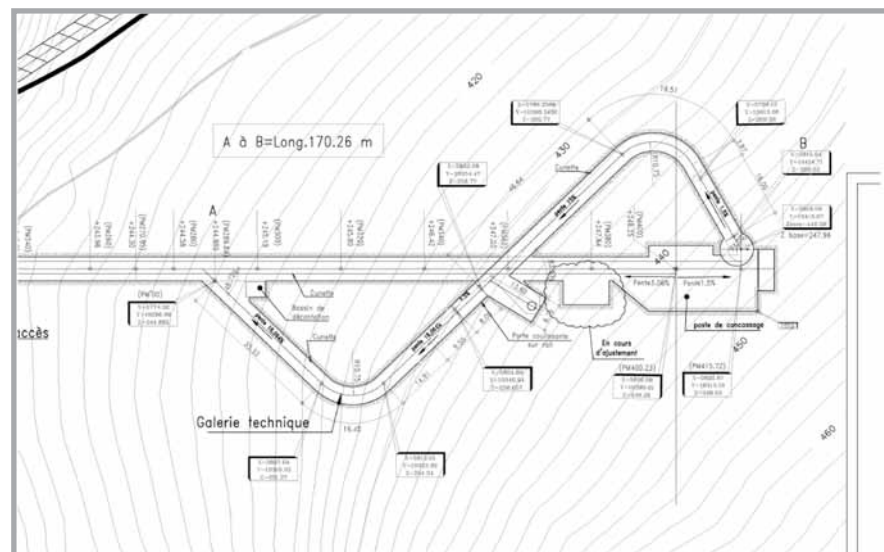


Figure 2  
Vue en plan  
Plan view

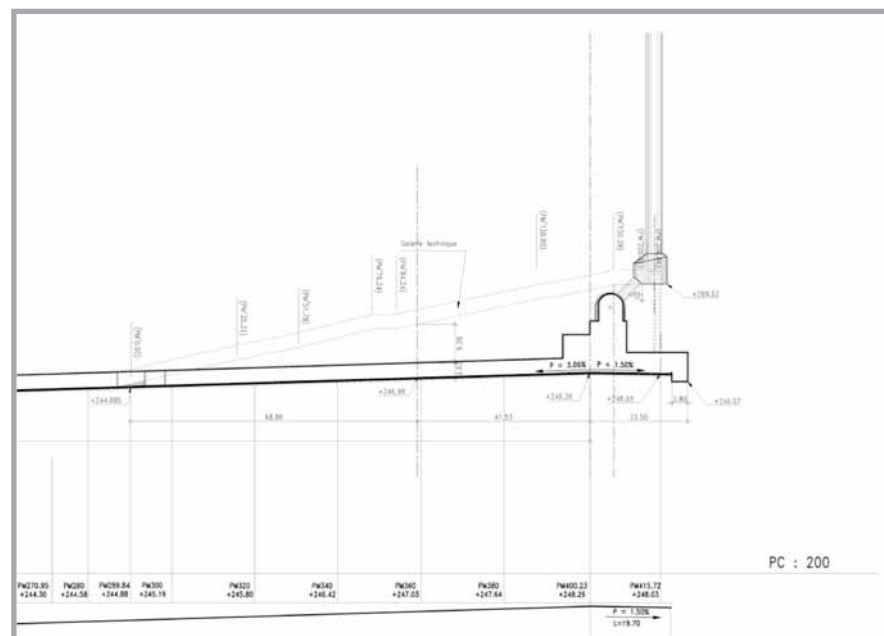


Figure 3  
Vue en élévation  
Elevation view

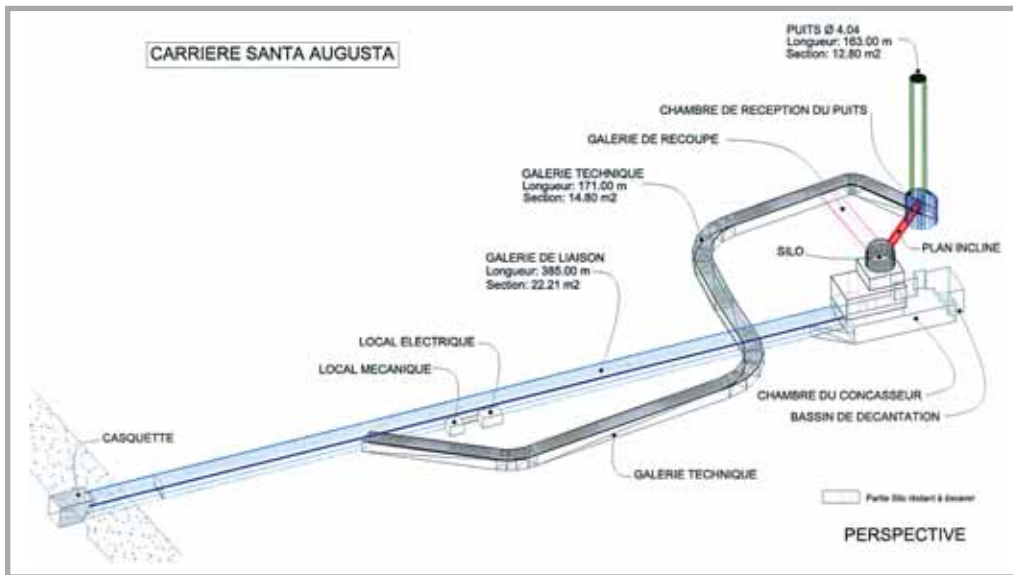


Figure 4  
Vue 3D  
perspective  
3D perspective  
view

Tableau I  
Tableau  
des ouvrages  
Table  
of structures

DESIGNATION	DESSCRIPTIF	VOLUME	PART MARCHE
GALERIE D ACCES	LONGUEUR	395 ML	8690 M3
	SECTION CREUSEE PENITE MONTANTE	22 M2	
		3%	30%
GALERIE TECHNIQUE	LONGUEUR	171 ML	2394 M3
	SECTION CREUSEE PENITE MONTANTE	14 M2	
		15%	12%
RECOUPE	LONGUEUR	30 ML	300 M3
	SECTION CREUSEE PENITE DESCENDANTE	10 M2	
		10%	2%
CHAMBRES	DE RECEPTION PLAN INCLINE		300 M3
			5%
SILO	RECEPTION TREMIE		900 M3
			7%
ZONE CONCASSEUR	LONGUEUR	20 ML	2000 M3
	SECTION CREUSEE	100 M2	
			14%
LOCAUX TECHNIQUES	BASSIN TRANSFOMAGASIN		250 M3
			3%
PUITS	HAUTEUR	163 ML	2088 M3
	DIAMETRE	4,04 M	
			10%
TOTAL			16922 M3
			83%

Photo 1  
Foration  
Drilling



Ce marché intéresse pour 83 % des opérations de creusement et soutènement des ouvrages définis dans le tableau I.

Le solde du marché (17 %) est relatif aux travaux d'équipement (blindage), de serrurerie (portes) et de génie civil extérieur (massifs de fondations, ouvrage de passage sous la RD 21)

## LES TRAVAUX

A l'exception de l'ouvrage puits, tous les creusements sont réalisés par abattage à l'explosif selon un mode opératoire classique en souterrain décrit dans le cycle suivant :

### Foration du schéma d'abattage

Dans ces calcaires jurassiques du Kimméridien et selon les sections à réaliser, le creusement nécessite en moyenne 3 ml de foration en diamètre 45 mm afin de loger un peu plus de 1,5 kg de dynamite pour abattre un mètre cube de terrain en place.

Sur le chantier, les forations des mines sont réalisées à l'aide d'un jumbo Montabert diesel-électrique sur pneus, portant deux glissières ACH7 permettant des longueurs de foration de 3,80 m avec des marteaux hydrauliques H80 (photo 1).

### Chargement de la volée

L'explosif utilisé est de l'Eurodyn 2000 de Nobel encartouché et mis en œuvre manuellement à partir d'une plate-forme élévatrice Normet pour les charges à disposer en hauteur. L'amorçage est obtenu par détonateurs électriques haute intensité choisis dans les gammes micro-retards et retards ordinaires afin de limiter au maximum les charges unitaires instantanées.

### Mise à feu et évacuation des fumées

Le poste de tir est resté installé sur le carreau inférieur, à proximité des appareils enregistreurs des mesures de vibrations des capteurs installés sur le viaduc SNCF et dans le tunnel SNCF de Santa Augusta croisé par les travaux au plus près à 40 m au dessous.

L'évacuation des fumées est faite par aspiration dans le Canar métallique de 1 200 mm.

### Ventilation

Le système de ventilation mis en place est conforme aux recommandations de la Cram Rhône Alpes et comprend une aspiration de 22 m³/s pour mettre la galerie d'accès en entrée d'air et des soufflages de 10 - 12 m³/s dans des ventubes de 800 mm

## LE MARCHÉ

Pour la réalisation de ces infrastructures souterraines, un marché élaboré par Tec Ingénierie désigné maître d'œuvre de l'opération, a été signé en décembre 2001 entre Vicat maître d'ouvrage et le groupement d'entreprises SBTPCI/CBM pour la partie travaux de construction à réaliser dans un délai de 12 mois.



pour décollage du bouchon des fumées de tir et brassage d'air frais aux fronts d'avancements (un ou deux fronts).

### Purge - Arrosage des déblais

Avant évacuation le marinage est fortement arrosé afin de neutraliser poussières et fumées. Les opérations de purge assez importantes dans ce type de matériaux sont exécutées à l'aide d'une mini-pelle sur chenilles équipée d'un brise-roche hydraulique de 200 kg.

### Marinage

Compte tenu des distances, le chargement et le roulage des déblais jusqu'au carreau inférieur (environ 400 m maximum) sont réalisés par deux Métroscop Wagner ST3.5 d'une capacité de 5 t au godet.

Ces déblais mis en dépôt provisoire sur le carreau inférieur sont amenés deux fois par semaine lors des coupures de circulation sur la RD 21 à l'actuelle carrière des Clues afin d'être utilisés pour la fabrication du ciment (photo 2).

### Soutènement

A l'exception de vingt cintres métalliques posés aux entrées galerie d'accès et zone concasseur, le soutènement courant est de type allégé obtenu par boulonnage (boulons métalliques de 2 à 5 m de long scellés au mortier) associé ou pas selon les cas à du grillage et béton projeté.

La foration des trous pour logement des boulons est réalisée avec un mini-panto Montabert portant sur un bras universel, une glissière ACH4 pouvant se mettre en drapeau. La pose des boulons se fait manuellement depuis le camion nacelle, et leur scellement est réalisé par cartouches mortier.

La mise en œuvre du béton projeté se fait à l'aide d'une machine voie sèche Tubaflo installée sur le carreau à demeure sous un silo de 30 t de VPI (béton sec prêt à l'emploi) (photo 3).

Pour la réalisation du puits, le marché a été signé sur une variante Raise-Drill qui, outre un attrait économique certain, présente de nombreux avantages sur les plans sécurité et nuisances.

Avec le sous-traitant Skanska désigné, le groupement SBTPCI/CBM s'est engagé à la fois à traiter les risques de passages karstiques et à respecter les tolérances de verticalité imposées.

La variante Raise-Drill est une méthode forage-alésage qui est beaucoup plus rapide qu'un fonçage traditionnel et qui ne fait intervenir que peu de main d'œuvre en surface (deux foreurs) et limite les interventions humaines à l'avancement aux opérations de montage de l'outil alésage.

Installée sur le carreau supérieur, la foreuse Robbins 91R de 26 t et son environnement d'environ



Photo 2  
Marinage  
Mucking



Photo 3  
Soutènement  
Supporting structures

200 t ont été transportés et assemblés sur place respectant ainsi la volonté de ne pas affecter le site par de gros travaux d'aménagements.

Le fonçage se fait alors en deux étapes :

◆ **première étape** : le trou pilote. Un forage descendant de 360 mm de diamètre est réalisé. C'est de la précision de cet avant-trou que dépend le succès de l'opération. En effet, la verticalité parfaite du puits, en limitant le risque de voir les produits percuter sa paroi, est indispensable pour permettre sa bonne tenue dans le temps.

Le résultat (0,1 % de déviation) est obtenu par le système Micon, introduisant derrière le tricône une tige équipée à la fois de capteurs (qui donnent en continu l'information sur la position de l'outil de forage) et de stabilisateurs (qui permettent une rectification automatique de la position).

Les trois passages karstiques rencontrés ont été traités par remplissage des vides (136 m<sup>3</sup>) avec coulis - mortier et béton ;

◆ **deuxième étape** : l'alésage. Après percement du trou pilote et contrôle de sa verticalité, celui-ci est agrandi au diamètre de 4 m en une seule passe remontante à l'aide d'un outil alésage de près

Photo 4  
Zone d'installation  
Raise-Drill  
en tête de puits  
*Raise-Drill installation  
zone at wellhead*



Photo 5  
Aléseur  
avant assemblage  
(en cours de montage)  
*Reamer prior  
to assembly  
(during setup)*



Photo 6  
Alésage  
*Reaming*



Photo 7  
Vue d'ensemble  
de l'installation  
*General view  
of the installation*



de 20 t équipé de 22 molettes à picots et mis en place à l'extrémité inférieure du train de tiges de 12 pouces (photos 4, 5 et 6).

Au fur et à mesure de l'avancée du percement, les tiges sont retirées en tête de puits et les *cuttings* (matériaux d'alésage) qui chutent à la base de celui-ci sont évacués par charge et roule vers le carreau inférieur.

Les travaux de réalisation de ces infrastructures souterraines ont donc fourni près de 40 000 t de produits calcaires à l'usine Vicat faisant déjà du chantier une nouvelle unité de production.

Ce chantier sous la tutelle de la Drire devait, par conséquent, à la fois satisfaire le R.G.I.E (règlement général des industries extractives) et les conditions d'exploitation définies dans l'arrêté préfectoral dévolu à Vicat en mai 99 d'autorisation d'exploitation de cette nouvelle carrière.

Sur le plan sécurité, le chantier devait établir les plans de prévention du modèle de l'exploitant en sus des actions plus habituelles dans les travaux publics (PPSPS...) à soumettre aux organismes (Cram, OPPBTP) avec le coordonnateur (Noresko) désigné par le maître d'ouvrage. Il est à noter que cette redondance toute relative n'a aucunement entravé la marche du chantier et a contribué certainement à une bonne maîtrise des risques liés à ces travaux de creusement.

Sur le plan environnement, les seuils portés dans l'arrêté d'exploitation ont :

- ◆ pour les rejets (35 mg/l) : engendré un nombre important d'adaptations des systèmes de captage et d'exhaure du fait de la nature et des évolutions des venues d'eau rencontrées (exhaure moyen 60 m<sup>3</sup>/h) ;

- ◆ pour les émergences sonores 3 dB (A) (nuit) et 5 dB (A) (jour) : conduit à optimiser une organisation privilégiant les opérations de tir et de marirage en période diurne et réservant le poste de nuit aux opérations de soutènement, foration, équipement.

Par ailleurs, la proximité des ouvrages SNCF (tunnel et viaduc) compte tenu des dispositions convenues (enregistrement des tirs, visite préalable) et des interventions du prestataire le Cetu (optimisation des plans de tir) n'a pas posé de problème et les seuils conseillés pour les vitesses particulières n'ont pas été franchis (photo 7 et tableau II).

Après une période de préparation et de mise en place des installations générales du chantier en décembre 2001 et janvier 2002, le premier tir a été effectué le 31 janvier 2002. Les mois de février et mars 2002 ont permis la mise en cadence et la constitution de l'effectif moyen du chantier :

- ◆ 5 cadres et ETAM ;
- ◆ 15 CNRO mineurs conducteurs en travail posté ;
- ◆ 5 CNRO mécanicien, électricien pour entretien et servitude.

Cet effectif a permis une activité à trois postes de travail (24 heures/24) du lundi au jeudi de chaque

semaine. Le poste du vendredi matin étant réservé aux exécutions :

- ◆ du sondage de reconnaissance en forage destructif (Ø 76 mm) de l'avancement de la semaine à venir (environ 40 ml) ;

- ◆ de la réalisation du béton de propreté du radier de l'avancement effectué.

Cette organisation qui limite pour les salariés la durée de travail à 35 heures par semaine, permet certes avec une bonne marge de terminer les cycles d'avancement entrepris, mais réduit la production hebdomadaire effective à quatre jours.

## ■ CONCLUSION

Une telle réalisation, exemplaire par sa conception et les moyens mis en œuvre, traduit le souci de pérenniser l'approvisionnement en matière première stratégique d'une activité d'industrie lourde, tout en préservant le cadre naturel. Elle se justifie donc dans une perspective à long terme, permettant de retirer les bénéfices d'un investissement aussi important. Elle représente bien une solution élégante et originale pour résoudre le problème de plus en plus délicat de l'accès à la ressource.

## ABSTRACT

Santa Augusta.  
Underground infrastructure for a new cement plant quarry

G. Pétard, G. Vertut, P. Rolandetti, B. Lasnes

In 2004 the new Santa Augusta quarry will be capable of supplying the 650,000 tonnes per year of limestone needed by the Vicat de La Grave cement plant in the Alpes-Maritimes region of France. The so-called "hollow bit" mining technique employed, which was adopted out of a strong concern for environmental conservation, requires major underground infrastructure work representing a large capital investment. The Spie/SBTPCI and Campenon Bernard Méditerranée consortium, awarded the contract for digging works, carried out the work in 2002, and this article describes the main choices they made concerning the methods and means employed and the performance achieved.

## RESUMEN ESPAÑOL

Santa Augusta.  
Infraestructuras subterráneas para la nueva cantera de una fábrica de cementos

G. Pétard, G. Vertut, P. Rolandetti y B. Lasnes

En 2004, la nueva cantera de Santa Augusta alcanzará una capacidad suficiente para suministrar las 650.000 toneladas anuales que precisará la fábrica de cementos Vicat, de La Grave, en los Alpes Marítimos. El sistema de explotación por el método denominado "del diente hueco" adoptado con un encarecido afán de respeto del medio ambiente, requiere importantes infraestructuras subterráneas que representan cuantiosas inversiones. La agrupación de empresas Spie/SBTPCI y Campenon Bernard Mediterráneo, titular de la contrata de excavaciones ha llevado a cabo estas obras en 2002. Se exponen en el presente artículo las principales opciones para los métodos y medios implementados, así como los resultados positivos conseguidos.

DESIGNATION	DESCRIPTIF	fév-02	mars-02	avr-02	mai-02	Juin-02	Juil-02	aoû-02	sep-02	oct-02
<b>GALERIE D ACCES</b>	LONGUEUR SECTION CREUSEE:22 M2  PENTE MONTANTE	53 ML	84 ML	98 ML	79 ML	59 ML	15 ML	7 ML		
<b>GALERIE TECHNIQUE</b>	LONGUEUR SECTION CREUSEE : 14 M2 PENTE MONTANTE				27 ML	90 ML	53 ML			
<b>RECOUPE</b>	LONGUEUR SECTION CREUSEE:10 M2 PENTE DESCENDANTE						29 ML			
<b>CHAMBRES</b>	DE RECEPTION PLAN INCLINE							182 M3 34 M3		84 M3
<b>SILO</b>	RECEPTION TREMIE							100 M3		700 M3
<b>ZONE CONCASSEUR</b>	LONGUEUR SECTION CREUSEE							230 M3	1770 M3	
<b>LOCAUX TECHNIQUES</b>	BASSIN TRANSFO/MAGASIN								0 M3	200 M3
<b>PUITS</b>	TROU PILOTE CIMENTATION ALESAGE						127 ML	36 ML 104 M3 25 ML	138 ML	
<b>TOTAL M3/MOIS</b>		<b>1166</b>	<b>1848</b>	<b>2156</b>	<b>2116</b>	<b>2558</b>	<b>1362</b>	<b>1014</b>	<b>3503</b>	<b>984</b>

Tableau II  
Planning et quantités réalisées  
*Schedule and quantities produced*

# Collecteur du Cheval

Le Conseil général de la Seine-Saint-Denis a confié à Chantiers Modernes

la réalisation d'un collecteur de diamètre 2000 d'une longueur de 320 ml dans le cadre de l'opération "bassin du Cheval Noir".

Cette opération comprenait trois marchés distincts :

- ◆ marché de parois moulés et de barrettes pour le bassin de rétention ;
- ◆ marché pour l'exécution du bassin ;
- ◆ marché pour l'exécution du collecteur et des prises d'eaux.



Photo 1  
Vue du tunnelier  
View of the tunnel boring machine

Photo 2  
Vue de la galerie blindée  
View of the lagged gallery



## ■ BUT DE L'OPÉRATION

Le but de cette opération est de décharger deux collecteurs ovoïdes T190/95, l'un situé sur la RN3 l'autre sous la route de Noisy à Pantin, en cas d'orages ou fortes pluies.

Les eaux sont collectées par deux prises d'eaux situées le long de ces deux égouts d'eaux pluviales et amenées à un bassin de stockage par un ouvrage souterrain de diamètre 2000.

Ces eaux sont stockées temporairement dans un bassin enterré de 36 ml de diamètre et de 19 ml de profondeur soit une capacité de stockage de 19000 m<sup>3</sup>.

En fin de précipitations elles sont pompées dans le bassin et rejetées dans ces mêmes ouvrages.

## ■ LE COLLECTEUR

Sa longueur totale est de 320 ml. Le volume des terrassements à extraire est de 1700 m<sup>3</sup> en place. Cet ouvrage a été réalisé en galerie souterraine avec un tunnelier à front ouvert et attaque ponctuelle avec blindage traditionnel (cintres et bois). En effet, la galerie n'ayant pas de puits de sortie, le tunnelier devait ressortir en reculant, chose impossible avec un revêtement en voussoirs.

Les caractéristiques du tunnelier sont les suivantes :

- ◆ diamètre de terrassement : 2,60 m ;
- ◆ longueur du tunnelier : 6 ml ;
- ◆ machine d'abattage : bras de pelle avec godet rétro ;
- ◆ puissance à la tête : 45 kW ;
- ◆ marinage horizontal avec marineur électrique et benne à déblais de 5 m<sup>3</sup> ;
- ◆ marinage vertical avec pont roulant de 20 tonnes ;
- ◆ évacuation des déblais par multibenne de 10 m (photo 1).

Le pilotage de la galerie est réalisé avec un laser de galerie donnant l'axe et la pente de la galerie. Le réglage se fait sur deux cibles en galerie plus une cible sur le tunnelier.

Le blindage derrière le tunnelier a été exécuté en cintres (HEB de 100 cintres) et bois (bastings). Les cadres étaient espacés tous les 1,20 ml (photo 2).

Le tracé avait les particularités suivantes :

- ◆ une courbe de 30 ml de rayon sur une longueur de 42 ml ;
- ◆ une courbe de 150 ml de rayon sur une longueur de 40 ml (figure 1).

Il nécessitait un abandon de la jupe du tunnelier à l'arrivée dans le puits de sortie du fait de l'angle d'arrivée de la galerie et des dimensions du puits de sortie.

Le terrassement dans les marno-calcaires durs a été exécuté en 50 jours de travail à deux postes de travail de 7 heures, avec un arrêt de chantier de 10 jours dû à la rencontre de terrains fortement pollués aux hydrocarbures. Le terrassement par le tunnelier terminé, le bétonnage de la galerie à l'aide de coffrage circulaire a été mis en œuvre. Les caractéristiques principales du béton et de la technique sont les suivantes :

- ◆ le ratio d'armatures est de 40 kg/m<sup>3</sup>. Ce ferrailage a été exécuté avec des treillis soudés spéciaux :
  - treillis préformés,
  - cotes des panneaux permettant l'approvisionnement et une mise en œuvre aisée.

# noir à Pantin

Patrick Sol



DIRECTEUR DE TRAVAUX  
Chantiers Modernes

Le ferrailage complet de la galerie a été exécuté en 5 jours de travail à un poste.

Le coffrage utilisé était un coffrage circulaire de 20 ml de long composé d'éléments de 2,5 ml.

Le génie civil a été réalisé avec deux équipes :

- ◆ la première équipe exécutant les courbes avec un coffrage de 5 ml ;
- ◆ la deuxième équipe exécutant la partie courante avec un coffrage de 15 ml.

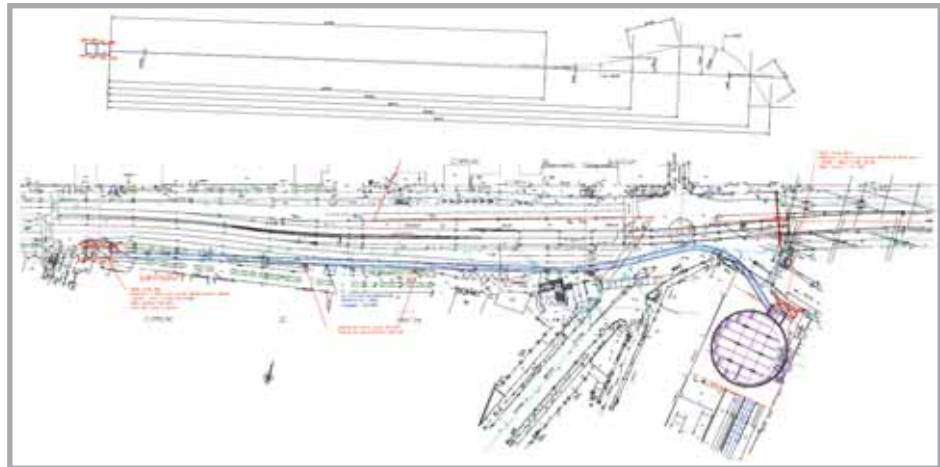


Figure 1  
Tracé de la galerie  
Gallery alignment

## ■ PRISE D'EAU LE LONG DE LA RN3

Il s'agit d'un ouvrage rectangulaire de 12 ml de longueur et 6 ml de largeur à une profondeur de 9 ml. Cet ouvrage a servi de puits de travail pour réaliser le collecteur souterrain (photo 3).

Les terrassements ont été exécutés en traditionnel : pelle hydraulique avec bâti long, évacuation par camion 15 t.

Le blindage était constitué de planches "métro" et liernes métalliques en HEB de 240 avec un buton central et bracons.

La prise d'eau a été réalisée en deux puits successifs de 6 ml x 6 ml du fait de la trop grande longueur du puits final.

Le génie civil a été exécuté avec des coffrages modulaires type "Paschal" hauteur 2,70 ml.

## ■ PRISE D'EAU ROUTE DE NOISY

Même ouvrage que la première prise d'eau profonde 5 ml au lieu de 9 ml.

## ■ REGARDS DE VISITE

Les trois regards de visite ont été construits sur le parcours du collecteur.

Ces regards de 2,00 ml x 1,00 ml de profondeur, en moyenne 12 ml ont été terrassés par la méthode traditionnelle cintres et bois, les terres étant évacuées par grue de puisatier et multibenne.

Un génie civil traditionnel a été exécuté en fond de puits, les cheminées d'accès étant en éléments préfabriqués.



Photo 3  
Vue du puits de travail  
View of the work shaft

## ABSTRACT

Cheval Noir main sewer in Pantin

P. Sol

The "Conseil général de la Seine-Saint-Denis" local council entrusted to Chantiers Modernes the construction of a sewer 2000 mm in diameter and 320 metres long as part of the "Bassin du Cheval Noir" project. This structure was constructed in an underground gallery with an open type partial-face tunnel boring machine.

The lagging behind the tunnel boring machine was built with centres (HEB 100 profile centres) and wood (battens).

Features of the alignment were as follows :

- a curve of 30-metre radius over a length of 42 metres ;
- a curve of 150-metre radius over a length of 40 metres.

This required abandoning the TBM's skirt on arriving in the exit shaft due to the angle of arrival of the gallery and the dimensions of the exit shaft.

The earthworks in the hard marly-calcareous rocks were performed by 50 days' work in two 7-hour work shifts, with one site stoppage for 10 days due to encountering land heavily polluted with hydrocarbons.

## RESUMEN ESPAÑOL

Colector del Cheval Noir, en Pantin

P. Sol

La Diputación provincial del departamento Seine-Saint-Denis ha encargado a la empresa Chantiers Modernes la ejecución de un colector de 2.000 mm de diámetro y una longitud de 320 m actuando en el marco de la operación "cuenca del Cheval Noir". Esta estructura se ha ejecutado en forma de galería subterránea mediante una tunelera de frente abierto y ataque puntual.

La entibación detrás de la tunelera se ha ejecutado mediante cimbras (perfil HEB de 100 curvados) y maderos (maderos gruesos).

El trazado presentaba las particularidades siguientes :

- una curva de 30 m de radio, con una longitud de 42 m ;
- una curva de 150 m de radio con una longitud de 40 m.

Este procedimiento precisaba un abandono de la campana de la tunelera a su llegada al pozo de salida, debido al ángulo de llegada de la galería y de las dimensiones del pozo de salida. Las obras de movimiento de tierras en los terrenos margo-calcareos se han ejecutado en tan solo 50 días de trabajos, en dos turnos de trabajo de siete horas, con una interrupción de las obras de 10 días con motivo de haber tropezado con terrenos sumamente contaminados por los hidrocarburos.

# Un microtunnel entre

Chantiers Modernes a réalisé pour le compte du Conseil général du Val d'Oise un microtunnel DN 800 mm intérieur sur une longueur de 550 m à une profondeur moyenne de 12 m en pleine campagne.

La difficulté majeure de ce chantier résidait dans la présence de deux couches de natures différentes (sable et roche). Or, le microtunnelier ne permet pas le changement d'outil en tête, il convenait donc de choisir ceux-ci très judicieusement. D'autant que, non sans un certain risque, mais fort d'une grande expérience, le responsable du projet, a décidé de réduire à quatre (au lieu des cinq prévus au départ) le nombre de tronçons, ce qui, sur ce linéaire s'apparente à réaliser des "drives" records en microtunnelier de 130/140 m.

Les cadences ont été de l'ordre de 14 m pour 2 postes de travail de 8 heures dans le sable et de 8 m pour 2 postes dans la roche. Ceci a permis de tenir les délais, pour un chantier démarré début février et terminé fin juillet.

Le Conseil général du Val d'Oise, maître d'ouvrage et maître d'œuvre devait réaliser le réseau de vidange du bassin d'autoroute sur la nouvelle liaison A15/A1, à proximité de l'aéroport Roissy Charles de Gaulle. Pour ce faire, il convenait de relier le bassin à un exutoire sur une distance de 550 m à une profondeur oscillant entre 7 et 13 m avec une moyenne de 11 m avant une petite partie en ciel ouvert, à faible profondeur, réalisée en blindage traditionnel.

A cette profondeur, le microtunnelier est la solution souvent la plus économique quand elle est possible, la traditionnelle tranchée à ciel ouvert étant en outre pénalisée par la présence d'une nappe phréatique et de l'autoroute A1 à proximité.

C'est donc bien naturellement que le maître d'œuvre de l'opération a mis en avant la technique de microtunnel. Pourtant ce chantier présentait une difficulté pour cette technique, en l'occurrence la présence de deux couches de natures différentes (sable et roche). Or, le microtunnelier ne permet pas le changement d'outil en tête, il convenait donc de choisir celui-ci très judicieusement. D'autant que, non sans un certain risque, mais fort d'une grande expérience, le responsable du projet a décidé de réduire à quatre (au lieu des cinq prévus au départ) le nombre de tronçons, ce qui, sur ce linéaire s'apparente à réaliser des "drives" records en microtunnelier de 130/140 m.

Le tir a nécessité trois puits de sortie et deux de poussée (photo 1).

En effet, avec un puits de poussée on réalise deux tirs, un dans chaque sens, en retournant le micro-

tunnelier. En cas de blocage de la tête, la première des solutions est d'essayer de réparer la machine en y accédant depuis les tuyaux; le DN 800 mm est le premier diamètre qui permet de circuler à l'intérieur en ayant pris les précautions nécessaires. En cas d'échec, il faut réaliser un puits à l'avant de la machine pour la ressortir et la réparer.

Pour répondre à la difficulté géologique, le microtunnelier a été équipé en tête d'outils roche et sable à la fois. C'est donc avec un micro tunnelier Herrenknecht AVN 800 à marinage hydraulique de diamètre extérieur 980 mm, que les tirs se succèdent pour poser un tuyau béton/polymère de 960 mm de diamètre extérieur pour 800 mm intérieur (photo 2). Ce matériau avait les caractéristiques requises en terme de résistance à la compression; en effet, plus les tirs sont longs et plus la poussée à appliquer sur les tuyaux est importante.

La longueur des tirs impliquant en effet de prévoir des efforts particulièrement importants (de 280 tonnes!) avec une marge de sécurité, le béton n'accusant que 200 à 220 tonnes en diamètre 800.

Sur le dernier tir, le laser a été perdu à plusieurs reprises. Le travail reprenait quelques heures après dès que le laser revenait sur la mire. Cet incident provenait d'une formation de buée dans le tuyau, résultante d'un contact entre les câbles hydrauliques chauffants d'un côté et l'eau présente en fil

Photo 1  
Vue d'un puits de poussée  
View of a thrust shaft



## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

*Maître d'ouvrage*  
Conseil général du Val d'Oise

*Maître d'œuvre*  
Conseil général du Val d'Oise

*Entreprises*  
Chantiers Modernes

*Matériaux*  
Tuyaux béton polymères Meyer

*Durée du chantier*  
6 mois (début février 2002 - juillet 2002)

*Coût*  
1 800 K euros (dont 75 % pour le microtunnelier)

# sable et roche

Jérôme Aubry

DIRECTEUR DE TRAVAUX  
Chantiers Modernes



d'eau du tuyau de l'autre côté (une petite arrivée d'eau s'était produite). Le problème a été résolu dès lors que l'on a ressorti les câbles de l'eau en les suspendant à la paroi.

Les cadences ont été de l'ordre de 14 ml en deux postes de travail de 8 heures dans le sable et de 8 ml pour deux postes dans la roche. Le chantier sous la conduite de Catherine Duchel a tenu les délais pour un chantier démarré en février et terminé fin août.



Photo 2  
Dispositif de poussage  
des tuyaux  
Pipejacking device

## ABSTRACT

A microtunnel between sand and rock

J. Aubry

Chantiers Modernes constructed on behalf of the "Conseil général du Val d'Oise" local council a microtunnel of nominal inner diameter 800 mm over a length of 550 metres at an average depth of 12 metres in the open countryside.

The major difficulty of this project was due to the presence of two strata of different types (sand and rock). Now, the microtunneller does not permit changing of the head tool, so that these tools had to be chosen very carefully. Especially since, not without taking some risk, but confident due to his great experience, the project manager decided to reduce the number of sections to four (instead of the five initially planned), which, over this length, is like executing record microtunneller drives of 130/140 metres.

The work rates were approximately 14 metres for two 8-hour work shifts in sand and 8 metres for two work shifts in rock. This made it possible to meet the deadlines, for a project started in early February and completed at the end of July.

## RESUMEN ESPAÑOL

Un microtúnel entre arena y roca

J. Aubry

La empresa constructora Chantiers Modernes ha ejecutado, por cuenta de la Diputación provincial del departamento francés del Val d'Oise, un microtúnel de diámetro interior nominal de 800 mm, de una longitud de 550 m situado a una profundidad media de 12 m en pleno campo. La dificultad principal de estas obras consistía en la presencia de dos capas de terreno de diferente naturaleza (arena y roca). Ahora bien, la microtunelera no permite cambiar la herramienta de ataque en cabeza y por consiguiente, precisaba optar por un equipo barrenador con la mayor precaución. Y ello con mayor motivo que, no sin incurrir en cierto riesgo, pero sí disponiendo de una gran experiencia, el responsable del proyecto tomó la decisión de reducir a cuatro (en lugar de los cinco proyectados en un principio), el número de tramos, con lo cual, en esta longitud tiene como resultado ejecutar "drives" récords en microtunelera de 130/140 m.

Los ritmos de trabajo se han situado en 14 m para dos turnos de trabajo de 8 horas en las travesías arenosas y 8 m para dos turnos en terrenos rocosos. Esta disposición ha permitido respetar los plazos impartidos, para unas obras iniciadas a principios de febrero y terminadas a fines de julio.

# Le lot Arge-Ferden du Un bi-tube de 11,6 km creusé

Le projet Alp Transit de nouvelle liaison ferroviaire entre les cantons du Valais et de Berne en Suisse consiste à réaliser un bi-tube sous le massif du Lötschberg sur 34,6 km. Il a été scindé en quatre lots principaux :

- le lot Steg;
- le lot Raron;
- le lot Ferden, avec deux sous-lots : ATF Ferden et Arge Ferden;
- le lot Mitholz.

Commencés en 1995, les travaux de génie civil de l'ensemble de l'aménagement seront terminés mi-2005 par la mise en œuvre du radier de voie en béton. La mise en service est prévue en mai 2007.

Associé à Losinger Sion, Prader et EDIT (groupement d'entreprises comprenant Evéquoz, Dénériaz Sion, U Imboden AG et Theler AG), Bouygues TP a signé en février 2001 le marché au bordereau du lot Arge-Ferden, pour un montant de 250 M euros et un délai de 50 mois.

La première phase des travaux du lot Ferden a été dévolue au groupement "ATF" et mis en vigueur en octobre 98. Elle comprenait la réalisation de la galerie d'accès inclinée à 13 % sur une longueur de 3921 m et le creusement des cavernes en pied de descenderie.

Le lot Arge-Ferden, exécuté en continuité du lot ATF-Ferden, comprend :

- ◆ la fin du creusement de la gare souterraine de secours sur 450 m (entre les PM 37240 et 37690) avec galerie d'évacuation et rameaux piétons;
- ◆ la fin du creusement des cavernes d'exploitation et des galeries de ventilation qui font la jonction avec le puits Fysterstella existant;
- ◆ le creusement des deux tunnels de base, au sud sur 1 160 m (entre les PM 37690 et 38850) et au nord sur 5 540 m (entre les PM 37240 et 31700);
- ◆ le creusement des rameaux piétons transversaux, espacés tous les 330 m;
- ◆ le creusement de la galerie d'accès et de ventilation sur 1 310 m;
- ◆ le creusement des zones d'aiguillage avec quatre élargissements sur 210 m et deux tunnels de liaison transversaux sur 230 m;

◆ le revêtement béton du tunnel Est en totalité et du tunnel sud-ouest sur 2 900 ml (depuis l'extrémité sud jusqu'à la zone d'aiguillage) (figures 1 et 2).

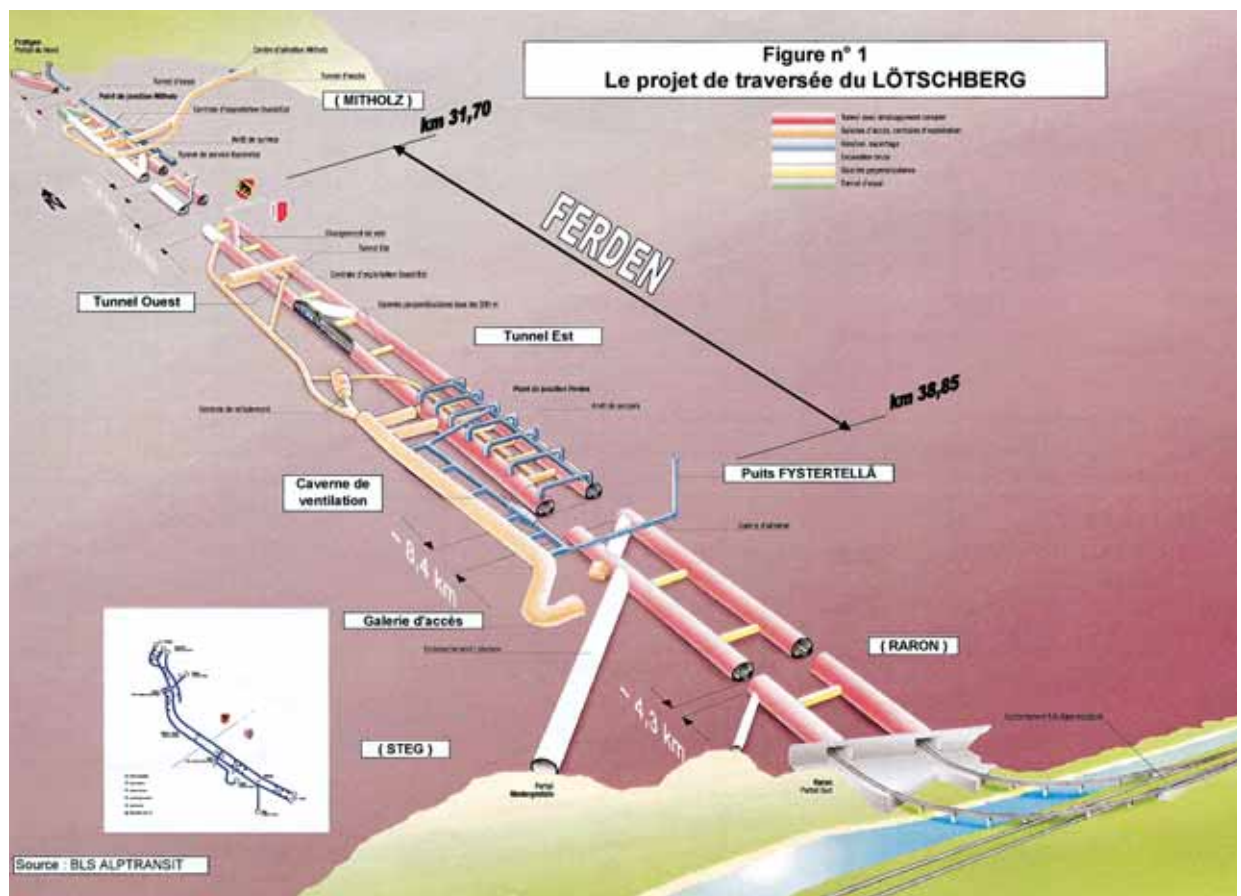
Le présent article décrit les méthodes et les techniques mises en œuvre pour la réalisation de ce chantier aux multiples contraintes.

## LES INSTALLATIONS DE CHANTIER EN PIED DE DESCENDERIE

En surface, à l'entrée de la fenêtre d'accès, la zone affectée à l'installation de chantier est étroite et fortement exposée aux intempéries et aux risques naturels (1 250 m d'altitude, risques d'avalanches). Il a été donc nécessaire d'installer la quasi totalité des équipements de production dans les cavernes situées en pied de la fenêtre d'accès :

- ◆ 2 centrales à béton de capacité totale 65 m<sup>3</sup>/h;
- ◆ 6 trémies à agrégats de 100 m<sup>3</sup>;
- ◆ 2 silos à ciment de 60 m<sup>3</sup> et deux silos de 30 m<sup>3</sup> pour la fumée de silice;

Figure 1  
Le projet de traversée du Lötschberg  
The Lötschberg crossing project





# projet Alp-Transit à l'explosif

Yves Chamberlin  
RESPONSABLE TECHNIQUE  
DU CHANTIER ARGE FERDEN  
Bouygues TP

Christian Hénault  
SERVICE MÉTHODES ET PRIX  
Bouygues TP



Photo 1  
Centrales à béton installées dans la caverne  
Concrete mixing plants installed in the cave

- ◆ 1 concasseur fixe, assurant un concassage des déblais au calibre 0/200 mm ;
  - ◆ 1 station de traitement des boues ;
  - ◆ 1 unité de gestion technique centralisée (GTC).
- Les galeries de la zone centrale (NHF-Nothaltes-telle) ont aussi été aménagées pour recevoir une partie des installations courantes afin qu'elles soient à proximité des postes de production. On y trouve des réfectoires et sanitaires, le laboratoire béton, des bureaux pour l'encadrement, des ateliers, des zones de stockage des produits consommables et une zone protégée réservée au stockage des produits d'émulsion et d'explosifs. Toutes ces zones sont équipées de moyens spécifiques de lutte contre l'incendie. Les installations de chantier en surface comprennent :
- ◆ les cantonnements, des bureaux et les ateliers principaux de stockage et de maintenance ;
  - ◆ un hall couvert avec deux trémies de 500 t pour le stockage des déblais dont l'évacuation se fait par voie ferroviaire ;
  - ◆ 6 silos de 300 m<sup>3</sup> pour le stockage des agrégats

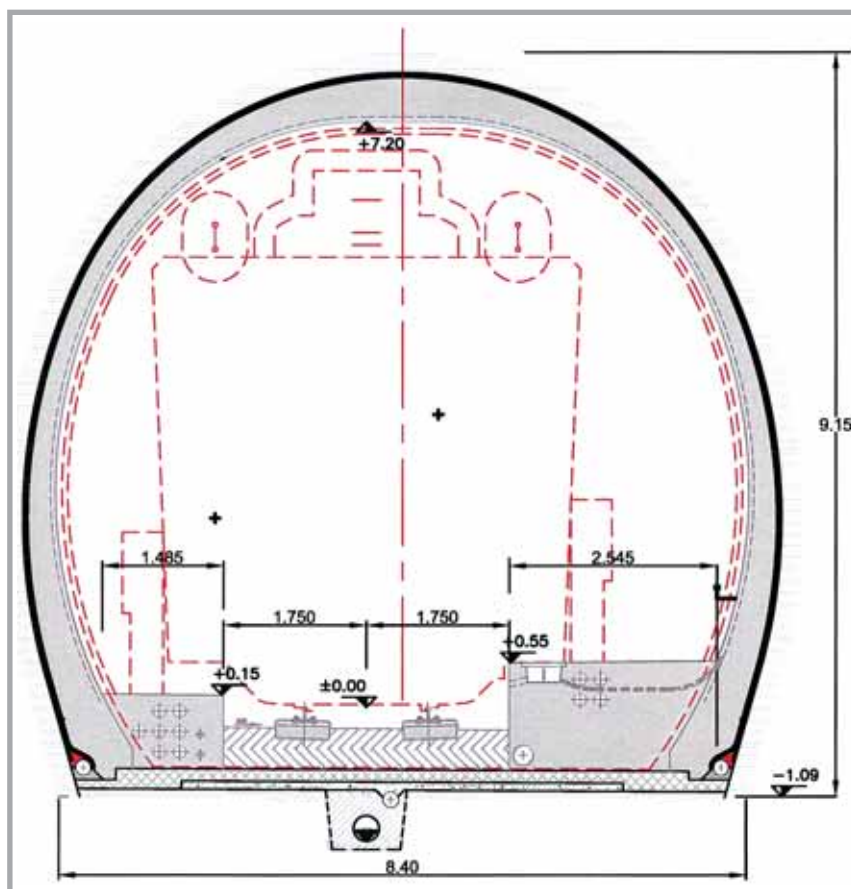


Figure 2  
Section type  
des tunnels  
de base (tunnel est)  
Typical  
cross section  
of the base tunnels  
(East tunnel)

et 5 silos de 100 m<sup>3</sup> pour le ciment et de la fumée de silice (approvisionnés par train) (photo 1).

## LES DISPOSITIFS DE CREUSEMENT, DE SOUTÈNEMENT ET DE MARINAGE

Afin de respecter les délais, le chantier d'excavation progresse sur cinq fronts simultanément : quatre fronts pour les deux tunnels de base (deux fronts côté nord et deux côté sud) et un front dans la galerie technique d'accès et de ventilation (galerie ZLS).

Au nord, sont alloués sur chacun des deux fronts :

- ◆ 1 jumbo trois bras automatisé ;
- ◆ 1 pelle Broyt ;
- ◆ 1 nacelle auto-élévatrice ;
- ◆ 1 concasseur mobile (granulométrie de sortie 0/200 mm) ;
- ◆ 1 convoyeur mobile à bande (débit de 400 t/h) ;
- ◆ 1 plate-forme mobile suspendue au parement

Photo 2  
Jumbo de foration  
trois bras  
Three-arm jumbo drill

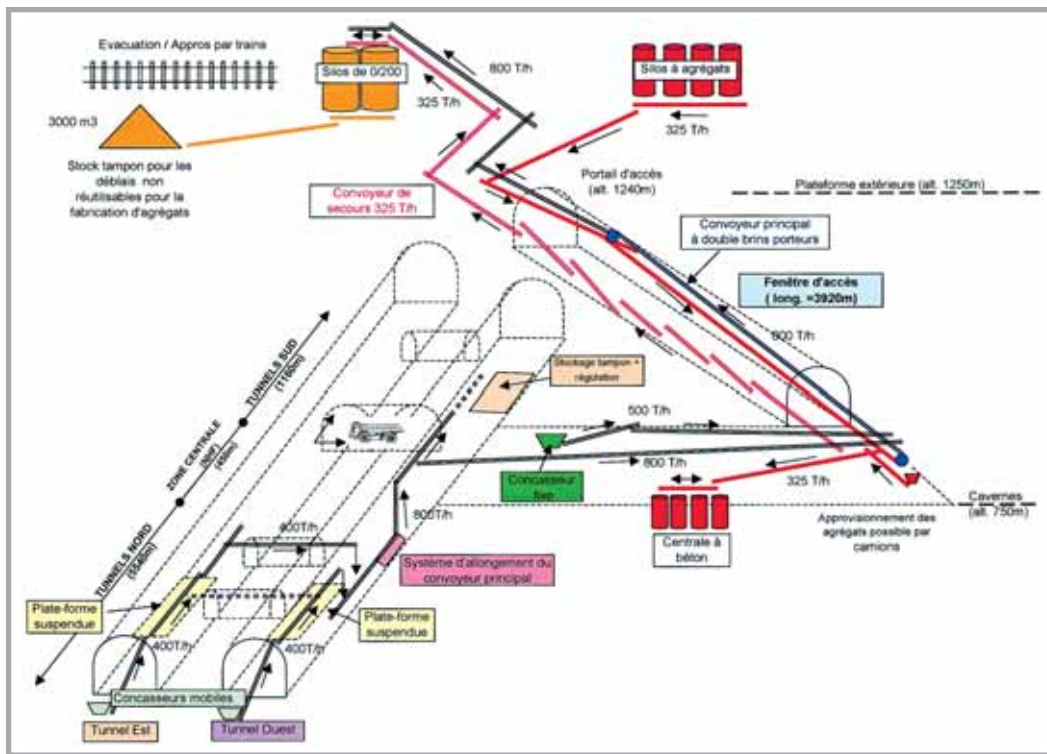
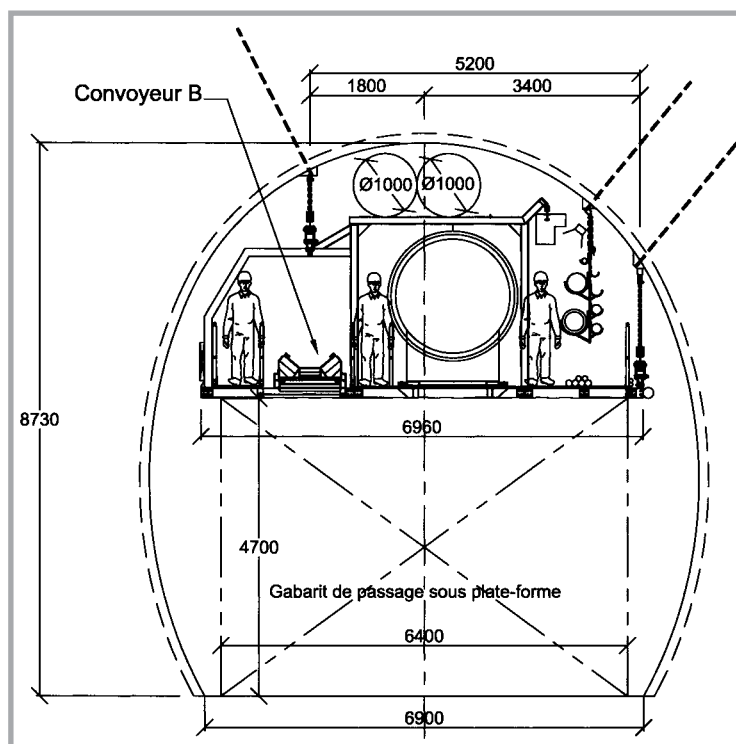


Figure 3  
Synoptique  
des convoyeurs à bande  
Block diagram  
of belt conveyors

Figure 4  
Plate-forme suspendue :  
coupe type  
Suspended platform :  
typical cross section



(longueur 125 m, poids 100 t), supportant l'ensemble des équipements électriques, de ventilation et de climatisation (photo 2).

Les engins utilisés pour le soutènement (un jumbo boulonneur et un robot pour le béton projeté) sont communs aux deux fronts.

Après le tir, vérifications d'éventuels ratés et ventilation des gaz et fumées, une chargeuse nettoie le radier et la partie mobile du système de marinage est déplacée vers le front.

Les roches sont chargées dans le concasseur par la pelle Broyt pour être ramenées vers l'arrière par des tapis à bande qui passent au-dessus de la plate-forme suspendue. L'ensemble de ces équipements peut assurer un débit de 400 t/heure.

Le convoyeur du tunnel nord-est rejoint le tunnel adjacent en passant par un rameau inter-tube proche du front.

Dans le tube nord-ouest, un convoyeur de 800 t/h recueille les déblais des deux fronts pour les emmener au bas de la fenêtre d'accès. Ils sont alors repris par le convoyeur à bande principal qui remonte en surface via la fenêtre d'accès, ou bien stockés temporairement sur place dans une zone réservée à cet effet dans la NHF.

Après marinage, le système est replié à une distance minimum de 45 m du front pour permettre la poursuite des opérations de soutènement provisoire, foration, chargement et tir de la volée suivante.

La plate-forme suspendue est avancée lorsque l'excavation a progressé d'un minimum de 20 m (figures 3 et 4).

**Au sud** on trouve pour chaque front :

- ◆ 1 jumbo trois bras automatisé ;
- ◆ 1 nacelle auto-élevatrice ;
- ◆ 1 portique roulant sur rails (longueur 20 m) supportant l'ensemble des équipements électriques, de ventilation et de climatisation.

Les engins utilisés pour le soutènement (un jumbo boulonneur et un robot pour le béton projeté) et pour le marinage (une chargeuse à déversement latéral et deux tombereaux) sont communs aux deux fronts.

Du fait de la moins grande longueur de tunnel au sud, le transport des déblais du front au concasseur fixe, située dans la zone NHF, est assuré par des tombereaux. Après traitement les déblais sont remontés à la surface par le tapis principal. Le cas échéant, ils peuvent aussi être stockés provisoirement.

Les portiques progressent de manière similaire aux plates-formes des fronts nord.

**Pour les autres zones** : les fronts d'excavation secondaires (galerie d'accès et de ventilation essentiellement), les déblais sont chargés dans des tombereaux par une chargeuse à déversement latéral. Ils sont ensuite traités comme ceux des tunnels sud.

Dans la zone NHF, une chargeuse et une pelle hy-

draulique sont spécialement affectées pour gérer les stocks tampons (en Ø/200 mm et Ø/800 mm) et assurer le chargement du concasseur fixe.

## LES DISPOSITIFS DE VENTILATION ET DE RÉFRIGÉRATION

Le contexte du chantier rend nécessaire la mise en place d'une ventilation puissante et d'un système de réfrigération, compte tenu des besoins :

- ◆ en air pour le personnel ;
- ◆ d'évacuation des poussières, gaz et fumées à front ;
- ◆ de dilution et d'évacuation des gaz d'échappement des engins de chantier ;
- ◆ d'évacuation d'une partie des calories provenant de l'échauffement de la roche et des divers matériels de chantier.

Le système de ventilation (figure 5)

Il est caractérisé par :

- ◆ une ventilation primaire assurant l'apport en air frais et l'évacuation de l'air vicié de l'ensemble du chantier ;
- ◆ des systèmes de ventilation secondaire situés aux différents fronts.

### La ventilation primaire

L'extraction de l'air vicié du chantier se fait par les galeries supérieures (zone ASS) situées au-dessus de la zone NHF et en liaison avec les deux tunnels principaux. L'aspiration est faite par deux ventilateurs de 630 kW (3,00 m de diamètre), installés dans la caverne de ventilation, dont le débit total est de 250 à 300 m<sup>3</sup>/s en régime normal.

Le rejet de l'air vicié se fait par le puits "Fyster-tella".

Les deux ventilateurs créent de fait une dépression dans les galeries de la zone centrale (NHF) provoquant l'amenée d'air frais extérieur par la fenêtre d'accès de Ferden.

### Les ventilations secondaires

Chaque tunnel est équipé au front d'un système d'extraction et de refoulement dans le circuit primaire des poussières, fumées et gaz.

L'air vicié est aspiré par un ventilateur de 250 kW pour passer dans un ventube de 2,50 m de diamètre reliant le front aux galeries de l'ASS. Des ventilateurs relais sont ajoutés tous les 2 km.

Installé à l'arrière de l'aspirant, un ventilateur auxiliaire (90 kW - 1,50 m de diamètre) souffle vers le front, améliorant ainsi la circulation et le brassage de l'air dans la section du tunnel entre la zone NHF vers le front.

En régime normal, le débit du flux d'air au front est de 50 m<sup>3</sup>/s.

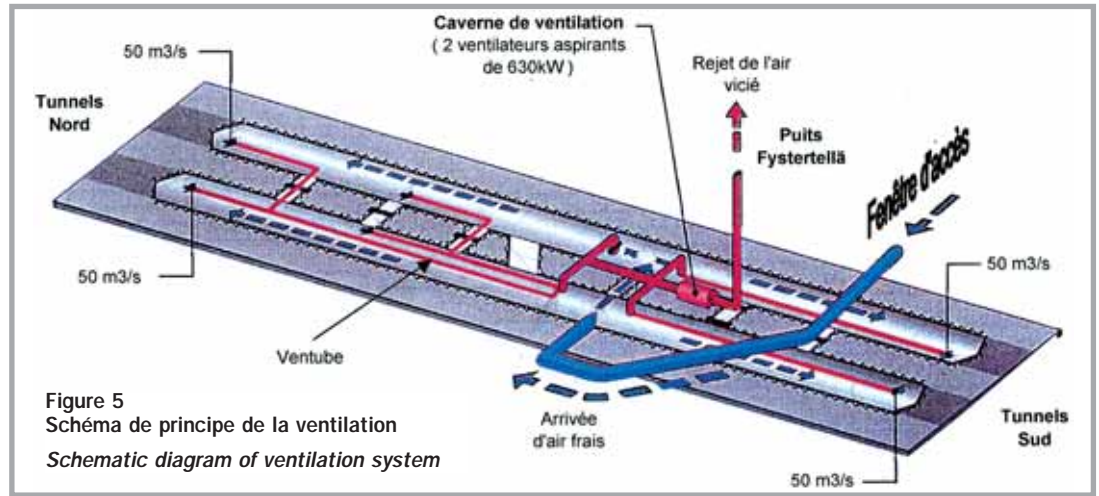
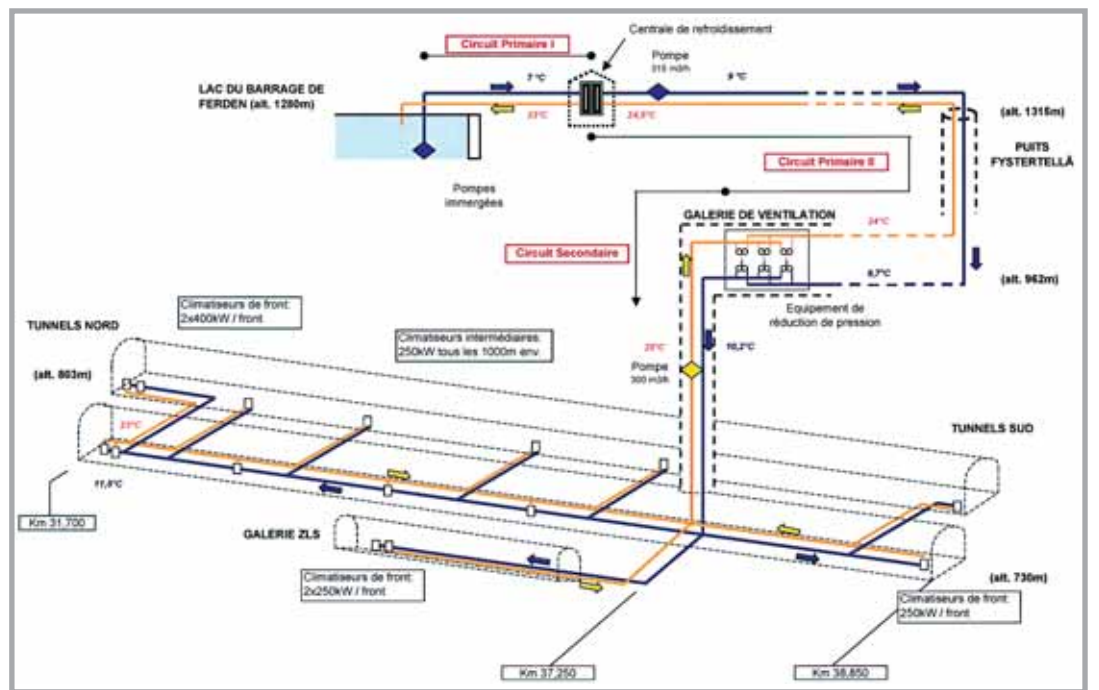


Figure 5  
Schéma de principe de la ventilation  
Schematic diagram of ventilation system



Le système de réfrigération  
(figure 6)

Figure 6  
Synoptique du système de refroidissement  
Block diagram of cooling system

La température maximale de la roche du massif est estimée à 45 °C (± 9° C). Pour obtenir un seuil de température à 28 °C aux postes de travail en tunnel, impossible à obtenir avec la seule action de la ventilation, il a été nécessaire d'étudier et de mettre en place un système de refroidissement.

Ce système est composé de trois circuits :

- ◆ le circuit primaire n° I dont les fonctionnalités sont :

- le pompage de l'eau froide dans la retenue du barrage de Ferden (eau à 7 °C),
- le transfert des frigories au circuit primaire n° II, au travers de deux échangeurs à plaques (centrale de refroidissement installée en surface dans un local technique),
- le refoulement de l'eau réchauffée dans la retenue ;

- ◆ le circuit primaire n° II assure :

- le transport de l'eau froide jusqu'à la station de réduction de pression (système de tubes à trois compartiments) installée dans la galerie de ventilation (zone ASS),

- ▶ - le retour de l'eau chaude aux échangeurs à plaques du circuit primaire n° 1.
- ◆ le circuit secondaire permet :
  - le transfert, à pression réduite de 16 bars, de l'eau froide jusqu'aux différents climatiseurs installés dans les tunnels,
  - le retour de l'eau jusqu'à la station de réduction de pression.

Photo 3  
Concasseur mobile  
au front nord  
*Mobile crusher  
on the North front*



### Particularités

Chacun des circuits est équipé d'une station de filtrage de l'eau et les seules conduites d'alimentation en eau froide (tubes métalliques de diamètre 200 à 300 mm) sont calorifugées.

Dans le puits Fystertellä, les conduites verticales sont dimensionnées pour une pression de 80 bars et équipées en pied de descente d'un compensateur de dilatation.

La centrale de refroidissement et les échangeurs de chaleur sont de conception modulaire afin de permettre une possible adaptation selon les besoins réels du chantier en cours d'exécution : la puissance frigorifique du système de refroidissement est de 3 MW et doit pouvoir être portée à 5 MW le cas échéant.

### ■ L'UNITÉ DE GESTION TECHNIQUE CENTRALISÉE (OU "GTC")

Les multiples contraintes du chantier (la longueur des tunnels excavés, simultanéité des travaux de creusement sur cinq fronts et de bétonnage du revêtement) et les obligations en terme de sécurité ont conduit à concevoir une installation spéciale pour :

- ◆ enregistrer en continu les paramètres de production ;
- ◆ permettre le pilotage manuel et à distance de certains équipements installés dans les tunnels : convoyeurs, station de pompage, silos de stockage.

Le système est composé de deux unités : une unité principale (dite "maître") située en surface et une seconde (dite "esclave") installée en bas de la fenêtre d'accès.

Par visualisation sur quatre écrans, l'opérateur suit en temps réel l'évolution des différents paramètres et tout mauvais fonctionnement lui est signalé par une alarme.

### Gestion des approvisionnements des agrégats et du ciment

A la GTC sont enregistrés le tonnage et le taux de remplissage des silos installés en surface pour le stockage du ciment (cinq silos de 100 t) et des agrégats (six silos de 250 m<sup>3</sup>), livrés par voie ferroviaire.

De manière identique sont suivis les silos de stockage situés en souterrain au pied de la centrale à béton. L'approvisionnement des agrégats est géré automatiquement et se fait par le convoyeur principal. Le ciment est apporté en tunnel par des camions-bananes.

### Gestion de la ventilation et du système de refroidissement

Différents paramètres sont enregistrés en continu :

- ◆ la température de l'air en tunnel au niveau des fronts ;
- ◆ la température de l'eau dans le circuit de refroidissement et le régime de fonctionnement des pompes ;
- ◆ la vitesse et le débit du flux d'air au niveau des deux ventilateurs principaux installés dans la caverne et des ventilateurs situés aux fronts.

Selon les informations reçues ou selon les besoins, l'opérateur responsable de la GTC peut agir manuellement à partir du poste de pilotage sur le régime de fonctionnement des équipements de ventilation et de refroidissement.

Le chantier d'Arge Ferden a spécialement fait l'objet de la mise au point d'un Plan de sécurité incendie. L'étude des différents scénarios de feu possibles a abouti à l'établissement d'un plan d'actions pour chaque situation, incluant en particulier la gestion de la ventilation sur l'ensemble du site.

### Autres paramètres de production enregistrés

- ◆ Visualisation sur écran du fonctionnement des trois concasseurs et enregistrement du tonnage des déblais évacués.
- ◆ Contrôle du fonctionnement des différents convoyeurs à bande.
- ◆ Suivi du fonctionnement de la station de traitement des eaux avec mesure de la turbidité.
- ◆ Enregistrement du débit et de la pression de l'air comprimé et de l'eau d'exhaure.

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Excavation : 1 240 000 m<sup>3</sup>

*Soutènement provisoire*

- Boulons : 210 000 u
- Cintres : 1 200 t
- Béton projeté : 53 000 m<sup>3</sup>

Béton de revêtement : 139 000 m<sup>3</sup>

Étanchéité : 63 000 m<sup>2</sup>

Canalisations : 54 000 m

## ■ LA RÉALISATION DES STRUCTURES BÉTON

Les structures béton consistent à réaliser, dans l'ordre suivant :

- ◆ le radier ;
- ◆ la voûte ;
- ◆ les banquettes.

Les bétons sont transportés à l'endroit de leur mise en place à l'aide de camions malaxeurs.

Au nord la circulation se fait par le tunnel ouest qui n'est pas revêtu et par un rameau pour passer dans le tunnel nord-est. Les ateliers de bétonnage sont en activité en même temps que les travaux de creusement, à une distance suffisante.

Au sud, les structures béton sont réalisées une fois la phase d'excavation achevée, dans le tunnel Est puis ouest (le tunnel adjacent étant utilisé par la circulation).

La cadence de réalisation de la voûte, compte tenu de la période de mise en cycle et aléas techniques, est de 25 ml moyen par jour avec quatre coffrages de 12,50 m (travail 5 jours/7 à trois postes).

## ■ CONCLUSION

Le chantier de Arge-Ferden s'inscrit dans les grands projets de tunnel. Les cadences de production élevées exigées au contrat et les contraintes d'environnement (site montagneux, forte chaleur de la roche, accès unique) ont nécessité la mise en place d'équipements de production de haute technicité et une forte organisation de chantier dont la maintenance est un élément capital.

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

*Maître d'ouvrage*  
BLS Alp Transit AG

*Maître d'œuvre*  
IGWS (Ingenieurgemeinschaft Westschweiz Lötschberg-Basistunnel Süd)

*Pour en savoir plus sur le projet*  
Présentation du projet de la traversée du Lötschberg sur le site : [www.blsalptransit.ch](http://www.blsalptransit.ch)

## ABSTRACT

The Arge-Ferden work section of the Alp-Transit project. A double-tube tunnel 11.6 km long with tunnelling by explosives

*Y. Chamberlin, Ch. Hénault*

**The Alp Transit project for the new rail link between the cantons of Valais and Bern in Switzerland involved constructing a double-tube tunnel under the Lötschberg mountains over 34.6 km. It was split into four main sections :**

- the Steg section ;
- the Raron section ;
- the Ferden section, with two sub-sections : ATF Ferden and Arge Ferden ;
- the Mitholz section.

**Begun in 1995, the civil engineering work for the entire development project will be completed in mid-2005 with laying of the concrete road foundation raft. Commissioning is scheduled for May 2007.**

**Together with Losinger Sion, Prader and EDIT (consortium consisting of Evéquoz, Dénériaz Sion, U Imboden AG and Theler AG), Bouygues TP signed in February 2001 the list price contract for the Arge-Ferden work section, for an amount of 250 million euros, with a completion time of 50 months.**

## RESUMEN ESPAÑOL

El lote de obras Arge-Ferden del proyecto Alp-Transit. Un túnel bitubo de 11,6 km, perforado mediante explosivos

*Y. Chamberlin y Ch. Hénault*

**El proyecto Alp Transit del nuevo enlace ferroviario entre los cantones del Valais y de Berna, en Suiza, consiste en ejecutar un túnel de doble tubo bajo el macizo montañoso del Lötschberg, con un recorrido de 34,6 km, que se ha subdividido en cuatro lotes principales :**

- el lote Steg ;
- el lote Raron ;
- el lote Ferden, con dos sublotes : ATF Ferden y Arge Ferden ;
- el lote Mitholz.

**Las obras de ingeniería civil del conjunto del proyecto – iniciadas en 1995 – se habrán de terminar a mediados del año 2005, por la implementación de la solera de hormigón de la vía férrea. La entrada en servicio se ha proyectado para el**

mes de mayo de 2007. En asociación con Losinger Sion, Prader y EDIT (agrupación de empresas formada por Evéquoz, Deneriaz Sion, U Imboden AG y Theler AG), Bouygues TP ha firmado, en febrero de 2001, el contrato según lista de precios del lote Arge-Ferden, por un importe de 250 M de euros y un plazo de 50 meses.

# La traversée sous-fluviale en Allemagne

Dans le cadre d'un projet de concession portant sur la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance d'une autoroute de 4 km située à Rostock (Allemagne), Bouygues TP a en charge la réalisation des études et des travaux de l'ensemble. L'ouvrage principal est un tunnel de 790 m de long. Ce tunnel est composé de six éléments préfabriqués dans une darse puis immergés et posés au fond de la rivière Warnow. Le contrat "Travaux" a été signé en décembre 1999, pour un montant de 156 M€. L'autoroute sera mise en service en septembre 2003.

## ■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE

À Rostock, ville située sur les bords de la Baltique, à 200 km au nord de Berlin, Bouygues TP réalise une autoroute urbaine (B 103n) à péage, de 2 x 2 voies, longue de 4 km. Celle-ci permettra le raccordement entre l'autoroute BAB 19 à l'est de l'estuaire de la Warnow et la route nationale B103 à l'ouest, le franchissement du fleuve étant assuré par un tunnel immergé de 790 m.

Ce projet constitue la première concession allemande, attribuée pour 30 ans à la Warnowquerung GmbH, dont Bouygues TP est actionnaire.

### Historique

En avril 1994, la loi sur le financement privé des routes fédérales entre en application. En décembre de la même année, la ville de Rostock lance alors un appel d'offres européen pour la construction et l'exploitation d'une liaison fixe entre les rives de la Warnow. En mars 1995, le groupement mené par Bouygues TP est préqualifié.

Le conseil municipal entérine l'attribution du marché en juillet 1996. Le contrat de concession est signé en juillet 1996 avec la société de concession créée pour le projet : la Warnowquerung GmbH und CO KG.

La procédure de DUP sera lancée en juin 1998 et sera conclue par décret en octobre 1999.

Quelques jours avant Noël 1999, le contrat de travaux est passé entre la Warnowquerung GmbH et Bouygues TP. L'ordre de service de démarrage des études est donné en mars 2000. Trois mois plus tard suit l'ordre de service de démarrage des travaux.

L'ouverture au trafic est prévue pour septembre 2003.

## Enjeux

Plusieurs défis sont à relever. Localement tout d'abord, ce projet fera le lien entre une zone résidentielle à l'ouest et une zone industrielle à l'est. Elle devra délester le centre particulièrement encombré en offrant un gain de temps substantiel (environ 20 minutes).

Au niveau fédéral ensuite car il s'agit de la première mise en application de la loi de 1994 sur le financement privé de projets d'infrastructure. Elle devrait entraîner d'autres sur le même modèle et permettre au Bund de s'engager résolument sur cette voie nouvelle de financement.

Au niveau européen enfin, puisque le projet a été approuvé par le programme TEN (Trans European Network).

Techniquement, il faut noter que ce tunnel immergé est seulement le troisième du genre en Allemagne après ceux de l'Elbe (1969-75) et de l'Ems (1980).

## ■ DESCRIPTION GÉNÉRALE DU PROJET

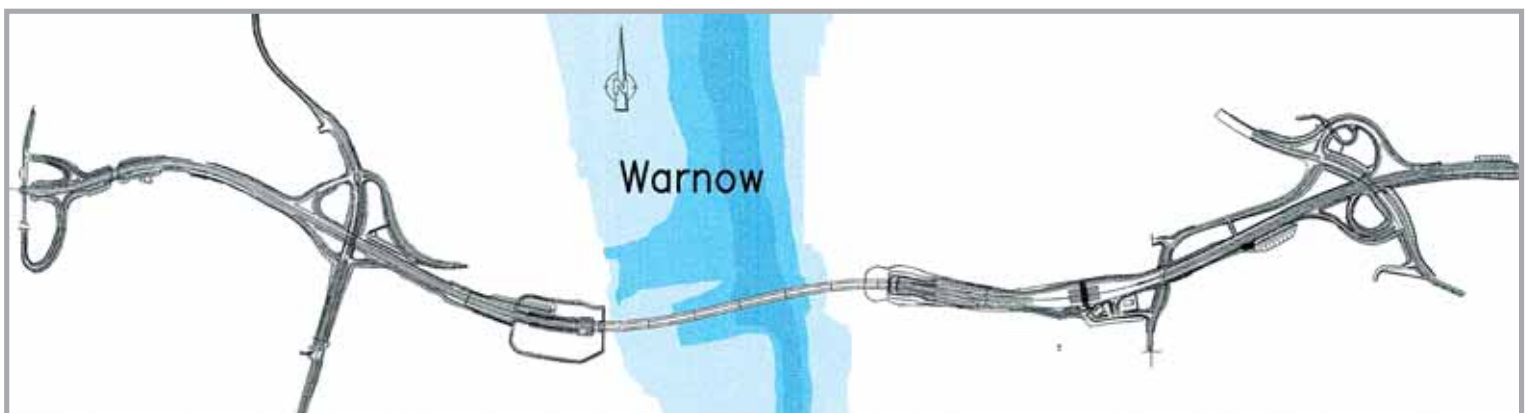
Une vue en plan du projet est donnée par la figure 1. Cinq parties d'ouvrages principales peuvent être distinguées :

- ◆ **les accès routiers** à l'ouest et à l'est, comprenant le rétablissement des voies secondaires, les échangeurs, les ponts et les écrans antibruit ;

- ◆ **les trémies du tunnel**, réalisées de la façon suivante :

- exécution d'une enceinte étanche par le procédé des parois souples en une phase. Les lamelles sont ancrées dans les marnes imperméables jusqu'à une profondeur de 30 m sous le terrain naturel,

Figure 1  
Vue en plan du projet  
Plan view of the project



# de la Warnow à Rostock

Olivier Miret  
DIRECTEUR DE PROJET

Rémy Roussel  
DIRECTEUR DE PRODUCTION

Mathieu Croll  
RESPONSABLE TRAVAUX

Laurent Dabet  
RESPONSABLE DES ÉTUDES

David Coulet  
INGÉNIEUR D'ÉTUDES

Fabrice Cao  
INGÉNIEUR MÉTHODES

Michel Weick  
DIRECTEUR COORDINATION  
TECHNIQUE

Jean-Marie Constant  
SERVICE MÉTHODES

Bouygues Travaux Publics

- mise en place d'un rabattement de la nappe à l'aide de puits dont certains resteront en phase définitive,
- terrassement à l'intérieur des parois jusqu'à une profondeur de - 10,00 m environ. La trémie ouest sert de darse dans laquelle sont construits, par paires, les six caissons du tunnel. Dans la trémie est, est réalisé, à ciel ouvert, le portail d'accès au tunnel,
- une fois les portails achevés, les trémies reçoivent les aménagements définitifs des rampes : locaux techniques, murs de soutènement, murs végétalisés ("bacs à fleurs");

◆ **le tunnel** incluant le portail ouest. Il commence à l'ouest au km 1.550 à - 8,40 m, pour plonger sous la Warnow jusqu'au point bas à - 19,28 m au km 1.979 et échapper ainsi au chenal de navigation reliant Rostock à la mer Baltique. Il ressort côté est, 790 m plus loin, au PK 2.340, après avoir inversé sa courbure en plan pour éviter une trop importante saignée dans la forêt de sapins d'Oldendorf;

◆ **le portail** Est long de 50 m;

◆ **la station de péage** se compose d'une barrière de péage de neuf voies, dont deux sont réversibles (km 2.823) ainsi que des bâtiments d'exploitation et de maintenance.

A ces ouvrages viennent s'ajouter des travaux annexes mais non secondaires : le dragage de la souille où seront posés les caissons, le remblaiement du tunnel une fois en position, les déviations des multiples réseaux "sectionnés" par le tracé, les aménagements paysagers participant fortement à l'insertion du projet dans son environnement.

rives jusqu'au plan d'eau formé par la Warnow. Une des difficultés du projet a été de maîtriser les risques liés à l'existence de nappes captives sous pression se trouvant dans les lentilles sableuses (construction de parois souples étanches autour des darses, pompage pour stabiliser les talus...).

Concernant la Warnow, les variations de niveaux sont minimales, subissant dans une faible mesure l'influence des hautes et basses pressions agissant sur le Baltique. A noter que les marées sont insignifiantes en mer Baltique (inférieures à 10 cm).



Portail Est  
East gate

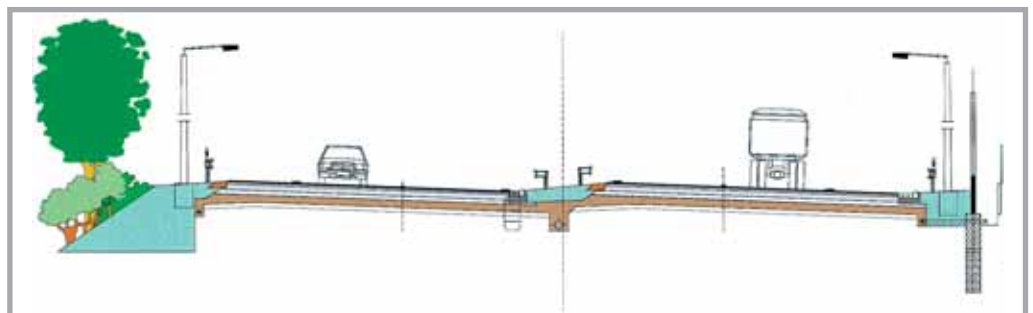


Figure 2  
Coupe transversale route  
B 103n  
Cross section of road  
B 103n

## ■ CONTRAINTES TECHNIQUES

### Géologie, hydrologie

Les principales formations rencontrées sont d'âge récent (quaternaire) constituées d'une succession de dépôts morainiques et fluvio-glaciaires. En profondeur se trouve du sable, puis au-dessus, du silt surconsolidé (sous le poids des glaciers), incorporant des horizons sableux et des boulders. Quelques blocs morainiques ont été trouvés lors du forage des parois de la trémie ouest. Dans la Warnow, se trouve en surface une couche importante de vase.

L'hydrologie du terrain présente les particularités suivantes : une nappe phréatique dont le niveau, stable, avoisine la cote - 1.00, remontant vers les

### Munitions

Des campagnes de détection et d'évacuation des munitions ont été menées par la ville de Rostock sur les rives et dans la Warnow, avant le début des travaux. En effet, Rostock a subi de très forts bombardements pendant la Seconde Guerre mondiale. Malgré cela, quelques interventions des équipes de déminage ont été nécessaires pendant la phase de terrassement des trémies.

### Géométrie

La B 103n est une route fédérale de grand trafic (24 000 véhicules par jour, dont 8 % poids lourds) en site urbain : 2 x 2 voies, séparées par un terre-plein central avec carrefours dénivelés (figure 2).

Pont n° 4  
Bridge No. 4



Remblaiement  
du tunnel en rive Est  
Tunnel backfilling  
on the East bank



- La vitesse autorisée y est de 80 km/h. Les autres contraintes géométriques sont :
- ◆ hauteur libre : 4,50 m ;
  - ◆ profil longitudinal : la pente maximale est de 3,84 %, dans le tunnel. Les contraintes sont liées à la profondeur du chenal de navigation, - 11,00 m et à sa largeur 75,00 m.

## Etudes

Les études d'exécution ont été réalisées sur la base de l'APD du contrat de construction par des bureaux d'études allemands, français et hollandais sous la supervision de Bouygues TP. Ces études d'exécution furent ensuite approuvées par un groupement d'ingénieurs indépendants, le concessionnaire et la ville de Rostock.

Les trois optimisations principales du projet ont été :

- ◆ la géométrie du tunnel ;
- ◆ l'écluse de fermeture de la darse ;
- ◆ la préfabrication du portail ouest couplé au caisson 6.

### La géométrie du tunnel

L'optimisation de la géométrie a consisté à trouver le meilleur compromis entre les facteurs suivants :

- ◆ la profondeur minimale requise pour maintenir le gabarit du chenal ;

- ◆ la volonté de minimiser les dragages, et donc le volume des vases à stocker sur les champs d'épandage ;
- ◆ la simplification de la construction des caissons en minimisant notamment les surfaces gauches. Au cours des études d'exécution, l'optimisation a abouti sur les quatre points principaux suivants :
  - ◆ les caissons sont à fond plat sauf le caisson n° 3 et une partie du n° 4 (point bas combiné à un changement de la courbure en plan de l'ouvrage). Les joints entre blocs sont verticaux dans la darse ;
  - ◆ la section type a été réduite de 8 % en diminuant les épaisseurs du radier, des voiles et de la dalle supérieure ;
  - ◆ les caissons sont constitués de huit blocs au lieu des 12 initialement prévus ;
  - ◆ les dimensions des niches de ventilation ont été adaptées aux dimensions des blocs.

### L'écluse de fermeture de la darse

L'écluse a pour but de maintenir la darse ouest à l'abri des eaux de la Warnow pendant la construction des caissons préfabriqués. Cette écluse doit être ouverte 3 fois pour la sortie des éléments 1 & 2, puis 3 & 4 et enfin 5 & 6. Chacune des ouvertures et fermetures se situe, d'un point de vue planning, sur le chemin critique. En effet, la fermeture de l'écluse est naturellement un préalable à la vidange de la darse et donc au redémarrage de la préfabrication des éléments suivants.

Outre la fermeture de la darse en phase provisoire, l'écluse, par sa structure fixe, participe à l'étanchéité du portail ouest en phase finale.

La solution envisagée au stade de l'APD consistait, après le bétonnage de la dalle de seuil réalisée en fond d'une fouille butonnée sur quatre niveaux, à remblayer ce gabion avec des matériaux de type enrochement pour la première phase, puis à constituer, avec les mêmes matériaux, un remblai maritime de part et d'autre d'une palplanche centrale pour les phases suivantes.

L'optimisation du procédé a conduit à élaborer puis mettre en œuvre une variante. Elle consiste en une structure métallique préfabriquée monolithique, de 29 m de long par 9 m de large sur 12 m de hauteur, mise en place sur la dalle de seuil à l'aide d'une grue flottante. La structure est ensuite raccordée à ses extrémités au pertuis en palplanches à l'aide de joints installés par des plongeurs. L'intérieur de la structure est ensuite rempli d'une grave compacte, afin de résister au déversement dû à la pression hydrostatique, atteignant 2000 t en hautes eaux.

### Préfabrication du portail ouest couplé au caisson 6

Initialement, la réalisation du portail ouest était prévue en place, après l'immersion et la pose du dernier caisson. Dans le but de limiter les tâches à réaliser dans la trémie une fois le tunnel posé, il a



été décidé de préfabriquer le portail ouest dans la continuité de la construction du caisson 6. Le portail est maintenant associé par la précontrainte provisoire au caisson 6, qui mesure ainsi 145 m au lieu de 120 m. Il est immergé et posé d'un seul tenant.

L'immersion est similaire à celle des autres éléments : l'injection de sable est limitée au caisson 6, alors que du béton immergé est injecté sous le portail. Le caisson et le portail sont alors recouverts de matériaux ayant pour but de lester l'ensemble. Le but de ce lestage est le blocage du caisson lors de la vidange de la darse. En effet, lors de la vidange, la suppression de la pression hydrostatique sur la face extérieure du portail ouest engendre des efforts horizontaux qui sont alors repris par le frottement du portail sur un fond de forme aménagé au préalable et injecté.

La solution offre en outre les avantages suivants :

- ◆ fermeture de l'écluse et de l'écran étanche simplifiée. En l'occurrence, plus de tirants de blocage à prévoir pour le maintien en position du tunnel ;
- ◆ ouverture du tunnel côté ouest anticipée, d'où une amélioration de la ventilation naturelle à l'intérieur du tunnel et une meilleure accessibilité pour les travaux d'aménagement du tunnel.

## LE TUNNEL

Le tunnel est construit selon la méthode des caissons immergés. Il est constitué de six caissons, de 119,20 m de long chacun, et de deux portails, respectivement 50 m à l'est et 25 m à l'ouest ; soit une longueur totale de 790,20 m.

### Préfabrication des caissons

Les caissons bi-tubes font 22,50 m de largeur (23,10 m avec talons au droit des niches de ventilation), et 8,30 m de hauteur (resp. 9,00 m) pour un poids de 22000 t environ (figure 3).

La structure des caissons est en béton armé, précontrainte provisoirement pour les phases de flottaison, de manutention et d'immersion. Chaque élément est découpé en huit blocs indépendants de 15 m de long (joints secs en demi-clé avec joint type waterstop).

Les caissons sont préfabriqués par paire dans la darse, équipés des appareils de pose, et fermés par des tympans en construction mixte (poteaux métalliques et voiles intermédiaires en béton) aux extrémités.

Chaque bloc est bétonné en deux phases, le radier puis les voiles et la dalle par un outil coffrant. L'étanchéité du tunnel est assurée par le seul béton de type BWu 35 sans complexe d'étanchéité rapporté.

La précontrainte, douze câbles 12T15, est appliquée une fois l'élément complet terminé, mais l'in-

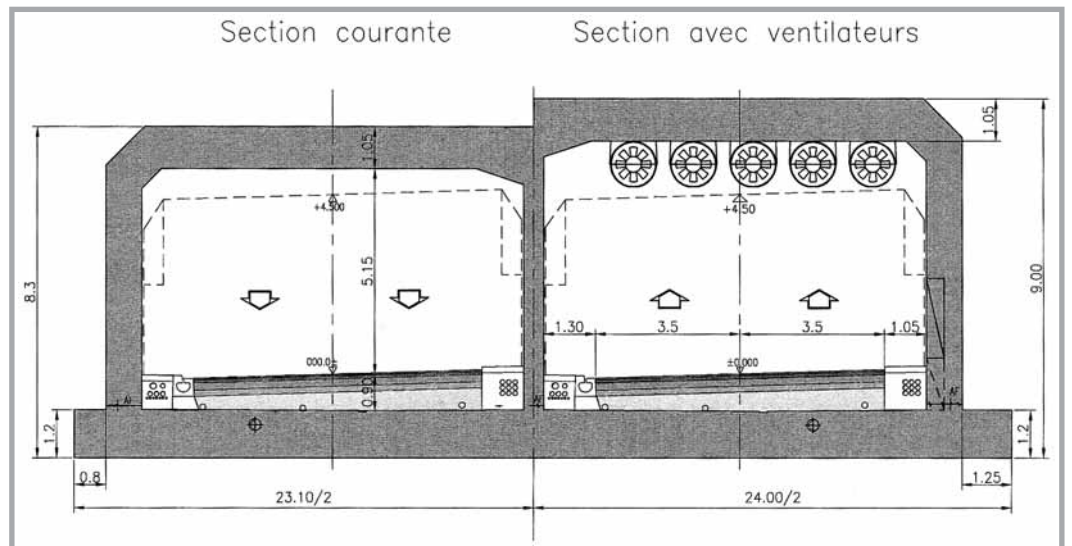


Figure 3  
Coupe transversale  
du tunnel  
Cross section  
of the tunnel



Fabrication  
des caissons 1 et 2  
dans la darse  
Manufacture  
of caissons 1 and 2  
in the dock

jection des gaines n'a lieu qu'après avoir envoyé la darse. Le caisson flottant, les joints entre blocs se referment, ce qui minimise les pertes aux joints. L'objectif essentiel de cette précontrainte est d'assurer pendant les phases provisoires une compression minimale entre les joints des blocs qui ne présentent pas de continuité de ferrailage. Les premiers et derniers blocs sont équipés d'un cadre métallique, sur lequel se fixe le joint d'étanchéité temporaire dit "Gina", nécessaire pour la connexion entre les caissons au moment de la pose. Ces joints, d'une longueur d'environ 52 m, supportent jusqu'à 3000 t de poussée engendrée par la pression hydrostatique appliquée sur la face ouest du caisson.

### Sortie et stockage des caissons

La sortie des caissons se déroule en quatre phases majeures :

- ◆ mise en flottaison dans la darse ;
- ◆ sortie de la darse via l'écluse ;

- ▶ ◆ déplacement dans le chenal provisoire jusqu'à la passe navigable du fleuve ;
  - ◆ transport du caisson jusqu'à la zone de stockage.
- La sortie de darse des caissons est réalisée à l'aide de treuils, de poulies de renvoi et de remorqueurs. Dans le chenal provisoire menant au chenal de navigation de la Warnow, les caissons sont pilotés par les remorqueurs. Une fois le chenal de navigation atteint les caissons sont remorqués jusqu'à leur zone de stockage.

Les contraintes environnementales sont également fortes :

- ◆ le trafic maritime sur le fleuve et dans le port ;
- ◆ le choix des zones de treuillage ;
- ◆ la minimisation des dragages ;
- ◆ le choix d'une zone de stockage appropriée.

## Immersion des caissons

La phase d'immersion des caissons nécessite les accessoires suivants, installés au préalable sur les caissons :

- ◆ 8 bollards de 25 et 50 t ;
- ◆ 4 anneaux de levage de 100 t ;
- ◆ 2 tympans aux extrémités du caisson équipés de portes étanches ;
- ◆ 1 trou d'homme étanche pour l'accès par la dalle supérieure ;
- ◆ 2 appuis métalliques sur des consoles en béton construites en extrémité du caisson sur le voile central et permettant l'arrimage du caisson n au caisson n-1 ;
- ◆ 10 réservoirs à ballast de 650 à 900 m<sup>3</sup>, permettant l'immersion du caisson ;
- ◆ 2 pistons de 350 t, permettant le réglage en Z du caisson ;
- ◆ une tour d'accès ;
- ◆ une tour de géomètre permettant de positionner le caisson en X Y.

De plus les équipements spécifiques de travaux maritimes sont également mis à contribution, comme :

- ◆ les treuils et poulies de renvois, câbles, ancrs, bouées... ;
- ◆ les pontons d'ancrages ;
- ◆ les pontons d'immersion jumelés puis arrimés aux caissons ;
- ◆ les remorqueurs ;
- ◆ un système de positionnement GPS.

Préalablement à la pose des caissons, le dragage de la souille a été effectué en deux phases :

- ◆ une phase préliminaire pour la sortie des premiers caissons permettant l'accès au chenal de navigation : les dragages jusqu'à la cote - 10,00 m ont représenté environ 240 000 m<sup>3</sup> ;
- ◆ une phase définitive, reprenant le profil longitudinal définitif, et représentant 620 000 m<sup>3</sup> de dragages. A noter que le dernier mètre est excavé dans les dernières semaines précédant la pose, afin d'éviter un envasement de la souille.

Puis pour chaque caisson, deux blocs de fondations, en béton, ont été mis en place dans des surprofondeurs excavées en fond de tranchée. Ces blocs serviront d'appuis provisoires aux caissons. Les caissons sont posés au fond de la Warnow de manière successive, en commençant du portail est vers la darse à l'ouest.

La procédure de pose consiste à (figure 4) :

- ◆ immerger le caisson en remplissant les ballasts (10 réservoirs de 650 à 900 m<sup>3</sup> dans chaque caisson) ;

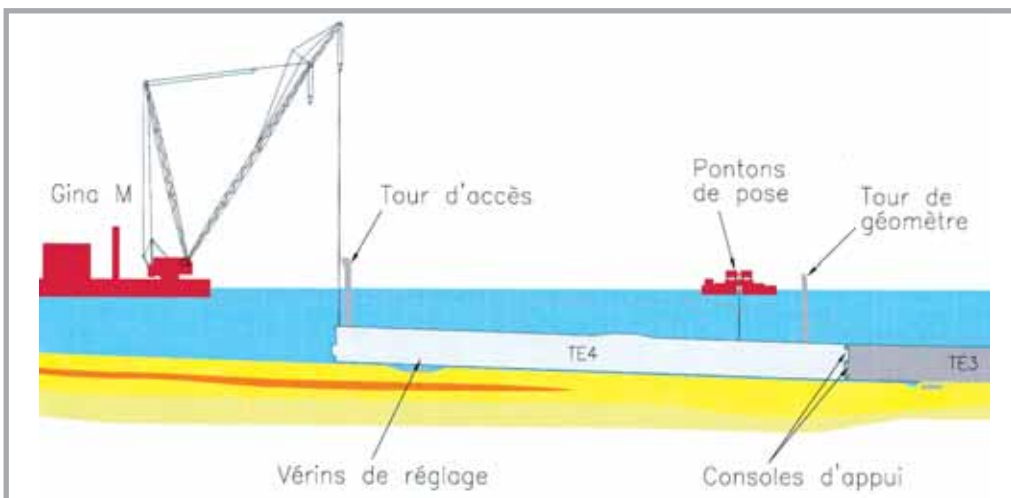


Figure 4  
Pose du caisson n° 4  
Laying of caisson No. 4



Caissons 1 et 2  
en flottaison  
dans la darse  
Caissons 1 and 2  
floating in the dock

Les quatre premiers éléments sont stockés dans le port de Rostock, jusqu'à la fin de la préfabrication des deux derniers.

Les contraintes techniques sont définies par le choix de minimiser les dragages dans le fleuve et dans les bassins de stockage, et la disponibilité des zones de travail. Les points critiques sont :

- ◆ le passage de l'écluse ;
- ◆ le contrôle de la flottaison des caissons en fonction des profondeurs des chenaux ;
- ◆ la manœuvrabilité des caissons ;
- ◆ les efforts internes dans la structure.

- ◆ se connecter au caisson précédant par l'intermédiaire d'une console placée sur le voile central du caisson ;
  - ◆ régler la position du caisson en X Y ;
  - ◆ vider la chambre entre les deux tympans des caissons n et n-1. Ce qui a pour effet de comprimer le joint Gina et d'assurer l'étanchéité provisoire du tunnel. Une fois la chambre vidée et le joint comprimé, le caisson n est alors accessible du portail Est (chaque tympan possède une porte) ;
  - ◆ régler en Z le caisson grâce à deux vérins de 350 t qui prennent appuis sur les deux blocs de béton ;
  - ◆ une fois le caisson réglé, commence l'injection du sable sous le caisson. Lorsque le caisson repose sur le sable, les deux vérins sont rétractés. Les réservoirs de ballastage du caisson sont alors remplis au maximum afin d'accélérer les tassements.
- Les caissons sont ensuite remblayés et protégés par un enrochement au droit du chenal de navigation.
- Les réservoirs peuvent alors être vidés puis démontés. Les travaux d'aménagement du tunnel peuvent alors commencer.

### Travaux d'aménagement du tunnel

Ces travaux consistent principalement à :

- ◆ démonter les appareils de pose (bollards, réservoirs de ballastage...);
  - ◆ assurer l'étanchéité définitive entre les caissons par l'intermédiaire d'un second joint dit "Omega";
  - ◆ bétonner une connexion entre les caissons afin d'assurer une continuité de l'ouvrage et réaliser une protection mécanique des joints d'étanchéité ;
  - ◆ nettoyer les surfaces de béton, après leur contact prolongé avec l'eau de ballastage.
- Puis viennent les travaux routiers qui recouvrent classiquement :
- ◆ le drainage : les eaux sont collectées au point bas dans un réservoir tampon, puis envoyées dans une conduite forcée dans le système de drainage extérieur des trémies ;
  - ◆ les trottoirs sous lesquels sont réalisées les multitubulaires destinées à l'alimentation en énergie du tunnel ;
  - ◆ la chaussée proprement dite.

### ■ SÉCURITÉ INCENDIE

Suite aux accidents survenus dans les tunnels alpins, notamment le tunnel du Mont-Blanc en 1999 et plus récemment celui du Gothard en Suisse, la sécurité incendie des tunnels est un sujet éminemment sensible.



**Sortie des caissons 1 et 2**  
*Exit of caissons 1 and 2*

Le tunnel de Rostock a non seulement été conçu en conformité avec les normes allemandes en vigueur, mais les évolutions envisagées au sein des commissions en charge des révisions et recommandations pour la construction et l'exploitation des tunnels ont été prises en considération et intégrées.

Avant tout la sécurité du tunnel de Rostock repose sur sa conception :

- ◆ le tunnel est court : 790 m ;
  - ◆ le trafic dans chaque direction est séparé dans deux tubes distincts ;
  - ◆ cinq passages dans le voile central relient les deux tubes, soit tous les 150 m, en cas d'évacuation ;
  - ◆ des niches d'appel d'urgence sont également implantées tous les 150 m dans chaque tube.
- Ces éléments sont des fondamentaux de la sécurité "passive" du tunnel ; ils sont essentiels puisqu'ils permettent l'évacuation rapide des lieux en cas d'incendie.

Ensuite, parmi les équipements du tunnel qui représentent les points majeurs de la sécurité "active", on peut citer :

- ◆ un réseau de caméras reliées au centre d'exploitation assure la surveillance continue du trafic ;
- ◆ un câble de détection incendie, possédant des capteurs tous les 8 m dans les deux tubes est connecté au système de gestion technique centralisée ;
- ◆ des téléphones d'appel d'urgence, des extincteurs et des bouches à incendie équipent chaque niche ;
- ◆ un système de haut-parleurs permet à l'exploitant d'informer les conducteurs de la situation et de les orienter ;
- ◆ un système de ventilation longitudinale (trois niches/tube, cinq ventilateurs/niche), maintient,

► lors d'un incendie, les fumées en dehors du tube sain, en le mettant en surpression ;

◆ des plots lumineux d'urgence tous les 15 m servent à orienter les usagers vers les portes d'accès au tube sain.

### ■ CONCLUSIONS

A ce jour, les six caissons ont été posés. Les travaux de remblaiement sont en voie d'achèvement ainsi que les travaux d'étanchéité du portail ouest. Les prochaines étapes sont les travaux d'aménagement du tunnel ainsi que les travaux de remblaiement dans la darse à l'ouest. Conformément au contrat de travaux, la mise en service est prévue le 16 septembre 2003.

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Parois souples : 45 000 m<sup>2</sup>

Palplanches : 1 000 t

Béton (caissons + portails) : 54 000 m<sup>3</sup>

Armatures : 7 000 t

Précontrainte : 150 t

#### Dragages

• Vases : 450 000 m<sup>3</sup>

• Marnes : 150 000 m<sup>3</sup>

• Sables : 250 000 m<sup>3</sup>

Remblais maritimes : 400 000 m<sup>3</sup>

Sable injecté sous les caissons : 30 000 m<sup>3</sup>

#### Terrassements

• Déblais : 500 000 m<sup>3</sup>

• Remblais : 375 000 m<sup>3</sup>

Drainage : 35 000 ml de canalisations et fossés

Chaussée : 100 000 t d'enrobés

Murs antibruit : 6 000 m<sup>2</sup>

Aménagements paysagers : 50 ha à planter

### ABSTRACT

The under-river crossing of the Warnow at Rostock, Germany

*Various authors*

**Within the framework of a concession project covering the design, construction, operation and maintenance of a 4-km motorway at Rostock (Germany), Bouygues TP is responsible for performing design engineering and works for the whole project. The main structure is a tunnel 790 metres long. This tunnel consists of six elements prefabricated in a dock and then submerged and laid on the bed of the Warnow River. The "Works" contract was signed in December 1999, for 156 million euros. The motorway will be commissioned in September 2003.**

### RESUMEN ESPAÑOL

La travesía subfluvial del río Warnow, en Rostock (Alemania)

*Autores diversos*

**Actuando en el marco de un proyecto relativo al establecimiento del concepto, la construcción, la operación y el mantenimiento de una autopista de 4 km situada en Rostock (Alemania), Bouygues TP se ha encargado de la ejecución de los estudios y obras del conjunto. La estructura principal está formada por un túnel de 790 m de longitud. Este túnel consta de seis elementos prefabricados en una dársena y, acto seguido, sumergidos e implantados en el fondo del río Warnow. El contrato de "Obras" fue formalizado en diciembre de 1999, por un importe de 156 M de euros. La autopista entrará en servicio durante el mes de septiembre de 2003.**

# Les tunnels d'El Azhar

## Une nouvelle génération de tunnels routiers

Pour réduire la circulation dans les rues du quartier de la mosquée El Azhar, et contribuer ainsi à valoriser les trésors architecturaux laissés par les Fatimides, les autorités égyptiennes décident en 1998 d'établir une liaison souterraine entre l'est du Caire et la place de l'Opéra. Cet ouvrage est placé sous l'autorité de la NAT (National Authority for Tunnels), et le 5 avril 1998 un contrat de conception-construction est signé avec le consortium franco-égyptien conduit par Vinci Construction Grands Projets et Arab Contractors, pour la réalisation de ces tunnels routiers de 2,5 km de longueur.

Les particularités de l'ouvrage tiennent aux difficultés de son insertion dans le sous-sol du vieux Caire, aux mesures nouvelles prises pour la protection des usagers et des structures en cas d'incendie, et au délai record de 40 mois.

*Joël Petit*  
DIRECTEUR DE SECTEUR  
*Sylvestre Guillien*  
DIRECTEUR DE PROJET  
*Pierre Giraud*  
DIRECTEUR DE SITE  
Vinci Construction Grands Projets

*Jean-Philippe Renard*  
DIRECTEUR DE ZONE  
Solétanche Bachy

*Bernard Falconnat*  
DIRECTEUR DÉPARTEMENT TRAVAUX  
SOUTERRAINS

*Jean-Michel Charvier*  
INGÉNIEUR DE SITE  
Scetauroute

### ■ LA NAISSANCE DU PROJET

A l'Est du Caire, dans des quartiers de maisons entassées autour des monuments laissés par les Fatimides, les rues traversantes sont rares. La principale d'entre elles, qui passe devant la célèbre mosquée El Azhar, est en permanence saturée. Le trafic y est si dense qu'on a dressé en son milieu une grille pour empêcher les piétons de la traverser. C'est une véritable coupure pour ce quartier historique que l'Unesco a inscrit dans la liste des sites exceptionnels (photo 1).

Au début de 1998, les autorités égyptiennes décident d'affirmer leurs efforts de rénovation des sites anciens. La saturation du trafic, dans la rue El Azhar, ressort alors comme l'un des principaux obstacles à cette rénovation. L'autopont construit en 1980, n'a rien résolu, car il n'a pas été poursuivi assez loin vers l'Est. Seule la création d'une vraie voie de transit souterraine pourrait contribuer au rétablissement de l'unité de ce quartier.

Malgré une certaine contestation, l'idée prend alors rang, au Caire, parmi les projets d'importance nationale. La liaison souterraine ira de bout en bout, depuis Salah Salem Road jusqu'à la place de l'Opéra (figure 1). Elle comprendra deux tunnels unidirectionnels, réservés aux véhicules légers et minibus, avec un gabarit de 4 m autorisant le passage éventuel des bus. En revanche leur accès sera interdit aux camions. Le projet est aussitôt placé sous l'autorité de la NAT (National Authority for Tunnels, maître d'œuvre du métro). Les objectifs de délais inhabituels, ne laissent place qu'à une seule solution : utiliser le tunnelier qui vient d'achever le creusement de la ligne 2 du métro.



Photo 1  
Trafic saturé sur cette artère séparée par une grille  
*Traffic congestion on this artery separated by a grating*



Figure 1  
Plan de repérage dans Le Caire  
*Map showing location in Cairo*

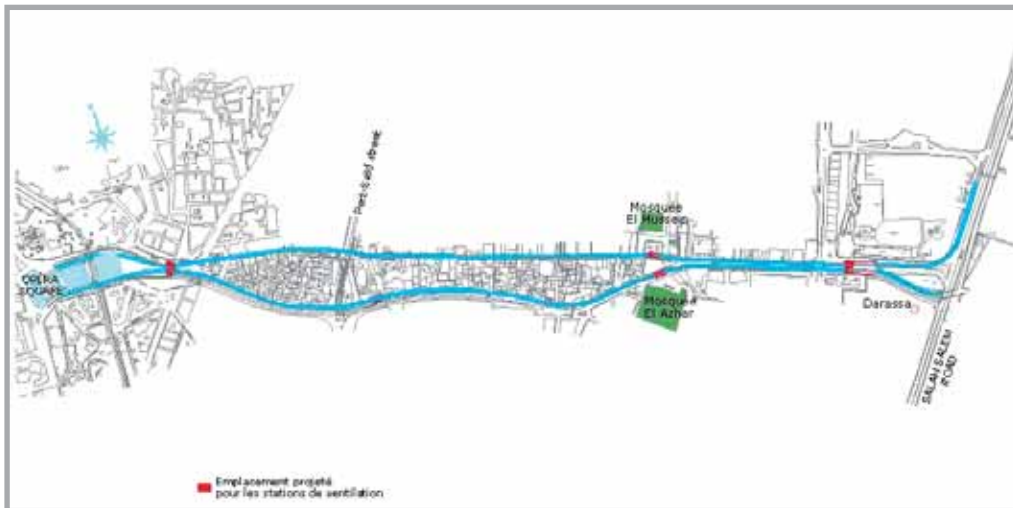


Figure 2  
Plan du tracé du contrat  
*Layout plan of contract*

## ■ LE LANCEMENT DU PROJET

Deux mois de négociations s'achèvent le 5 avril 1998 avec la signature d'un contrat avec le groupement du métro qui réunit sous le pilotage de Campenon Bernard SGE (VINCI CGP), Arab Contractors, Bouygues, Eiffage, Spie TP et Solétanche Bachy. La mise en vigueur prendra effet à la fin du mois de mai 98. Les outils (tunnelier, ateliers de parois, engins) sont mobilisables. Les méthodes, les procédures sont rodées. Les équipes franco-égyptiennes se connaissent depuis quinze ans. Le chantier peut démarrer sans délai. Mais la construction doit attendre la conception qui part de la feuille blanche. Pour compléter ses capacités de conception le groupement associe la direction des travaux souterrains de Sceaoute à son travail.

## ■ LA RECHERCHE DU TRACÉ ET DU PROFIL EN LONG

### L'indispensable topographie d'un quartier inextricable

Il faut d'abord prendre la mesure de l'environnement. La première épreuve est pour l'équipe de topographie. La dernière carte de ce quartier date de 1912. Pour retrouver la configuration des rues et des bâtiments derrière les tentures des boutiques, pour apprécier les profondeurs des fondations environnantes, sur une zone de 125 hectares, une équipe de vingt ingénieurs et techniciens, abat en trois mois, plus souvent de nuit, un travail harassant.

### La recherche du tracé final en trois étapes

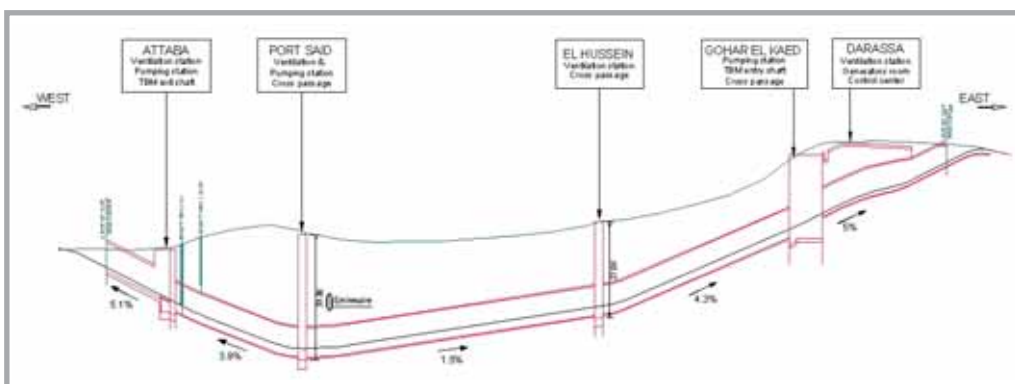
Sans attendre l'achèvement des levés, la recherche du tracé commence, guidée par l'observation des rues en surface (âge, état et hauteur des immeubles, réseaux apparents) pour trouver le passage du tunnelier. Le tracé initial, annexé au contrat, suivait celui des rues (figure 2). On espérait ainsi limiter les interférences avec les bâtiments voisins, réduire les expropriations et faciliter les communications avec la surface et les implantations des stations de ventilation. Mais les obstacles surgissent : les pieux de l'autopont le long de la rue El Azhar, l'égout sous la rue Moski, l'étroitesse des espaces pour les stations. Pour les éviter la décision est prise de passer sous la vieille ville, dont les fondations ne sont pas profondes. Restait l'indispensable station intermédiaire.

Le tracé final (figure 3) prend sa forme définitive fin juillet 1998, avec la décision des autorités de placer les stations de ventilation sur des parcelles publiques pour éviter les tracasseries de l'expropriation : la première sur le square situé à côté de la mosquée



Figure 3  
Plan du tracé avec stations de ventilation dédoublées  
*Layout plan with doubled ventilation stations*

Figure 4  
Profil en long  
*Longitudinal section*



El Azhar, la seconde rue Port Said, sur l'espace d'une école transférée.

Le profil en long est étroitement lié à ces choix (figure 4). Passer sous la vieille ville implique une réelle maîtrise des tassements. Il ne peut être question d'accepter des désordres dans ce quartier marchand et touristique. Les profils sont donc approfondis, avec un point bas à 35 m sous terre, pour passer sous l'émissaire de la rue Port Said. La partie centrale est relativement plane, les pentes aux extrémités atteignent 5 %.

En juillet 1998, deux mois seulement se sont écoulés pour connaître les lignes directrices du projet final : une partie forcée de 1 750 m est encadrée par deux sections en tranchée couverte, de 400 m côté Salah Salem et de 350 m côté Attaba.

## LES FONCTIONS DES OUVRAGES

### La partition des espaces dans les tunnels

#### Sections forées au tunnelier

Les dimensions de la section transversale des tunnels de El Azhar résultent d'abord de l'utilisation sans modifications du tunnelier du métro. La tête de coupe a un diamètre de 9,4 m et dégage un diamètre intérieur de 8,5 m. Cette géométrie libère un gabarit vertical appréciable de 4,00 m mais limite la largeur des voies à 3 m. Partant du principe d'une ventilation longitudinale la coupe type prend forme et se compose de (figure 5) :

- ◆ l'espace trafic, avec une chaussée unidirectionnelle de deux voies de 3 m, bordée de deux trottoirs (1,15 m à droite, 0,75 m à gauche), déversée vers la gauche. Les eaux et polluants accidentels sont captés par un caniveau à fente continu avec des regards siphonides empêchant la propagation éventuelle d'un feu d'hydrocarbure ;
- ◆ l'espace supérieur, réservé à la ventilation/éclairage, avec les accélérateurs et les luminaires ;
- ◆ l'espace technique en partie inférieure, qui correspond à la galerie sous chaussée. On verra plus loin que cette galerie (2,2 m x 2 m), sert aussi à évacuer les usagers en cas d'urgence.

#### Sections creusées en tranchées

Le dessin de ces sections résulte de l'extension, dans les tranchées, des dimensions retenues pour la section forcée. Les trottoirs sont élargis dans les courbes d'entrée et de sortie pour la visibilité. La chaussée est fondée sur un remblai de 0,8 m recouvrant le radier de la tranchée.

### Les ouvrages annexes

Un centre de contrôle et cinq stations de ventilation, tous enterrés, se succèdent le long du par-

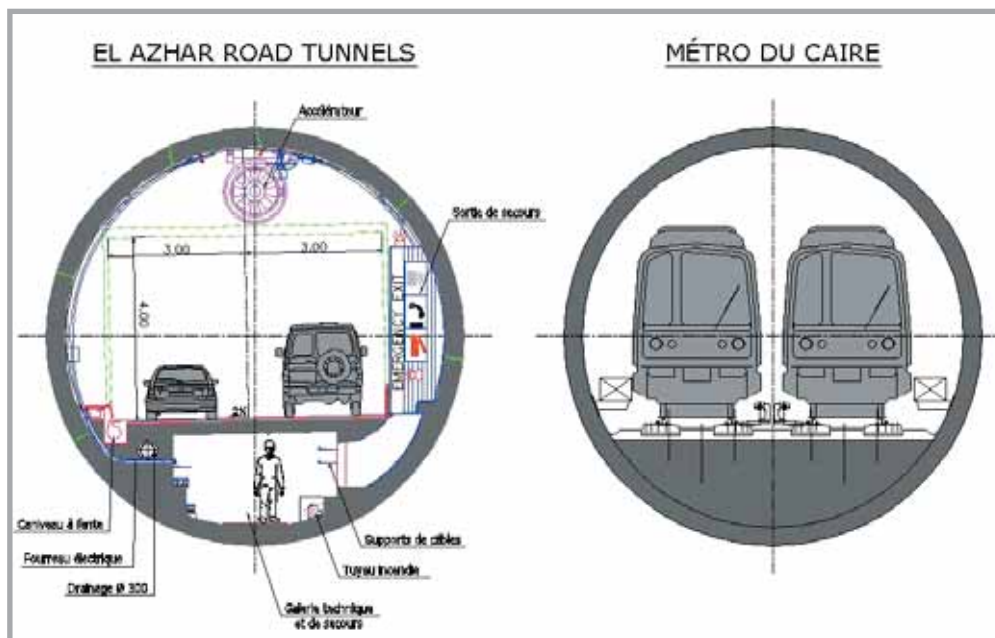


Figure 5  
Coupe type avec, à droite, la coupe du métro

Typical cross section with, on the right, the cross section of the underground railway

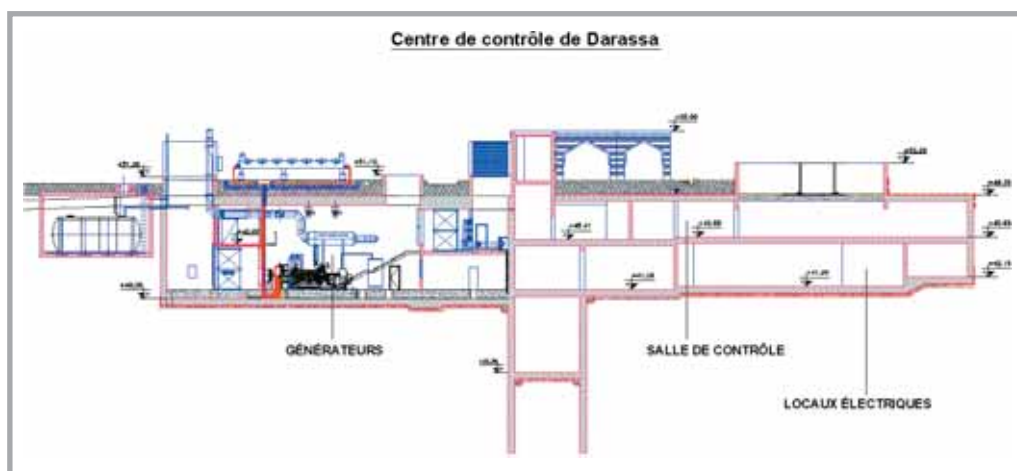
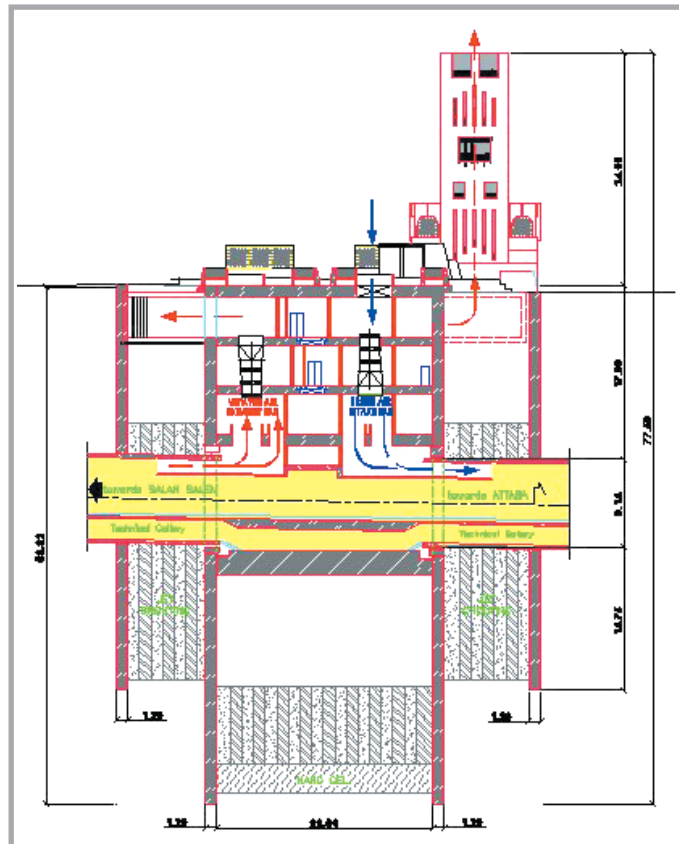


Figure 6  
Coupe longitudinale avec générateurs et aérorfrigérants  
Longitudinal section with generators and air coolers

cours. Ces volumes rectangulaires ont été créés à l'intérieur d'enceintes en parois moulées. On trouve d'est en ouest :

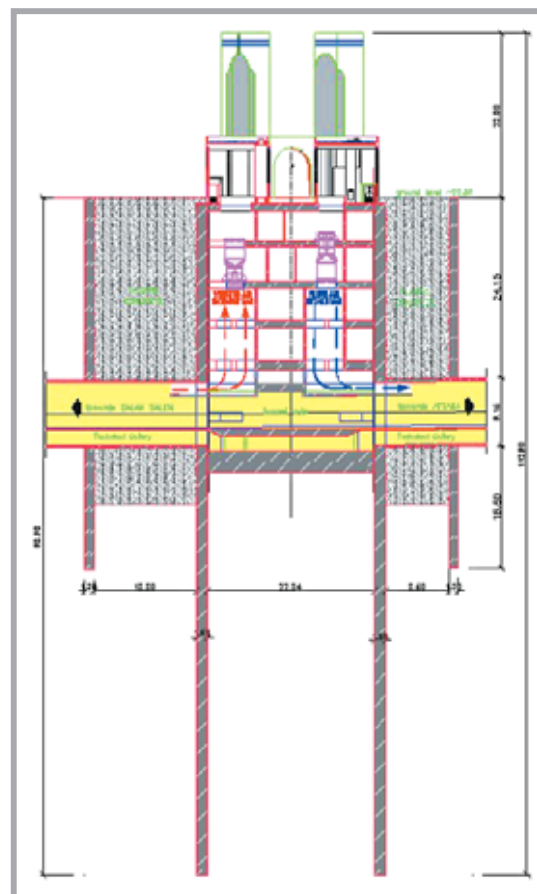
- ◆ le centre de contrôle de Darassa : deux niveaux, de 25 x 70 m en plan, de 10 m de profondeur, cernés de parois moulées de 0,80 m d'épaisseur et de 20 m de profondeur. Ils regroupent le centre de contrôle, les locaux électriques principaux, la salle des générateurs de secours, une station de désenfumage et un puits d'accès aux issues de secours (figure 6) ;
- ◆ l'espace souterrain affecté à la maintenance : aménagé dans les puits de démarrage du tunnelier sous la rue Gohar El Kaed, avec deux salles jumelées de 15 x 93 m. Les parois moulées des enceintes ont 1,0 m d'épaisseur et 35 m de profondeur ;
- ◆ la station de ventilation de El Hussein : deux volumes jumelés rectangulaires mesurant en plan 18 m x 24 m, excavés entre des parois moulées

**Figure 7**  
Coupe verticale  
de El Hussein  
avec ventilateurs  
et traitement de sols  
*Vertical cross section  
of El Hussein with fans  
and ground surfacing*



**Photo 2**  
La place El Hussein  
avec la cheminée à droite  
*El Hussein square  
with the chimney on the right*

**Figure 8**  
Coupe verticale  
de Port Said  
avec ventilateurs  
et traitement des sols  
*Vertical cross section  
of Port Said with fans  
and ground surfacing*



de 1,2 m d'épaisseur et de 55 m de profondeur. Chaque station comporte quatre niveaux qui se répartissent sur une profondeur de 27 m (figure 7); Les choix architecturaux de la partie émergente de cette station auront été l'objet d'après discussions. Entre les deux mosquées les plus fréquentées

du Caire, l'implantation et la forme des structures nécessaires aux prises d'air frais et aux rejets d'air vicié ont été discutées pendant un an entre les plus hautes instances politiques. La solution choisie, sur la base des propositions de l'architecte égyptien Gamal Bakry, place la haute tour de rejet dans un angle de la place, et les grilles de prise d'air frais au milieu d'un espace revêtu de granite (photo 2);

◆ la station de ventilation de Port Said : deux enceintes jumelées rectangulaires, semblables en plan à celles de la station El Hussein, mais plus profondes (35 m), avec cinq niveaux excavés à l'intérieur de parois moulées de 1,5 m d'épaisseur et d'une profondeur exceptionnelle de 90 m. Cette station, située au point bas, est jumelée avec une station de stockage et de relevage des eaux de ruissellement ou des déversements accidentels pollués dans le tunnel (figure 8).

A Port Said, le contexte architectural est très différent. La station apparaît comme un ouvrage original, dans un quartier aux façades ingrates. Conçue comme un ensemble d'arches, avec une place centrale, entourée d'un jardin, son dessin est l'œuvre de Charles Lavigne (photo 3);

◆ le puits de sortie du tunnelier à Attaba : pour sortir les éléments du tunnelier, deux chambres distinctes, de 16 m de profondeur, mesurant en plan environ 60 m x 15 m, étaient nécessaires. Elles ont été creusées à l'intérieur de parois moulées de 1,00 m d'épaisseur et de 35 m de profondeur. Une station de désenfumage, une station de ventilation annexe, une station de relevage des eaux et un local de climatisation y ont ensuite trouvé place.

## LES DISPOSITIONS PRISES POUR LA SÉCURITÉ EN CAS D'INCENDIE

En 1998, les textes en matière de sécurité sont en pleine évolution. La conception de l'ouvrage est lancée sur la base des recommandations (PIARC) et directives existantes, pour des ouvrages réservés aux véhicules légers. Mais l'analyse montre que l'interdiction des tunnels aux véhicules lourds n'est pas aisée à mettre en œuvre. Pour les autorités égyptiennes, le risque d'incendie doit être mesuré en tenant compte de l'intrusion possible d'un véhicule dangereux. Dès lors, les hypothèses deviennent celles d'un incendie de 100 MW, avec une courbe d'élévation de la température liée à un feu d'hydrocarbures (courbe RWS).

Tandis que le projet avance, survient en mars 1999 la catastrophe du Mont-Blanc. Les tragédies européennes, poussent alors les concepteurs à redoubler de prudence. Le projet va ainsi subir des adaptations successives avec le souci permanent de créer un outil de transport aussi sûr que possible.



## La protection des structures contre l'incendie

Les tunnels de El Azhar sont creusés dans des sables et des argiles, baignés par la nappe phréatique. Le cas extrême d'un incendie de 100 MW, avec des températures de plus de 1 000 °C pendant deux heures, conduirait à la ruine des voussoirs préfabriqués de 0,4 m d'épaisseur. Les conséquences d'un effondrement, même localisé, du revêtement seraient dramatiques.

Il a donc été décidé de protéger les voussoirs par la projection, sur un treillis ancré dans la voûte, d'une couche de mortier, à base d'aluminates avec des inclusions de fines particules de bois (produit FB135 mis au point par Thermal Ceramics). La capacité de protection contre l'échauffement, vérifiée par des essais effectués dans un laboratoire en Norvège, est remarquable. Exposée pendant deux heures à une température de 1 350 °C, une couche de 5 cm seulement limite à 200 °C l'élévation de température à la surface des voussoirs. Cette application est sans doute une première mondiale.

## La sécurité des usagers

Les drames récents ont souligné l'importance de la rapidité d'évacuation dans un espace saturé par les fumées. Le risque d'asphyxie hante les esprits. Les recommandations mettent donc l'accent sur la réduction des espacements des issues et sur la création d'un itinéraire de secours protégé.

### La solution des toboggans associés à la galerie sous chaussée

Dans la partie forée, la galerie technique sous chaussée (2 m de hauteur - 2,2 m de largeur) peut être cet itinéraire. Ses liaisons avec l'espace trafic, doivent s'insérer dans la largeur du trottoir de droite (1,15 m), avoir un débit d'évacuation suffisant en cas d'urgence, et une configuration incitant les usagers à ne s'en servir que dans les cas exceptionnels. Les toboggans donnent la réponse (figure 9). Les issues de secours et les toboggans sont le maillon final d'un système de secours complet pour :

- ◆ les pannes fréquentes, avec création de garages temporaires près des bornes d'appel d'urgence ;
- ◆ les évacuations d'urgence, avec un itinéraire jusqu'à la surface sans l'assistance de secours ;
- ◆ l'arrivée des secours avec les accès depuis la galerie technique près des accidents ou incendies.

L'espacement des issues résulte d'une enquête sur le taux d'occupation des véhicules du Caire (de l'ordre de deux par véhicule), d'où découle le nombre d'usagers dans le tunnel saturé : environ 60 personnes/100 m. Pour évacuer tous les usagers dans les six premières minutes après le début de l'incendie (durée pendant laquelle la stratification des fumées et la propagation de la chaleur restent maîtrisables par les outils de la ventilation), avec

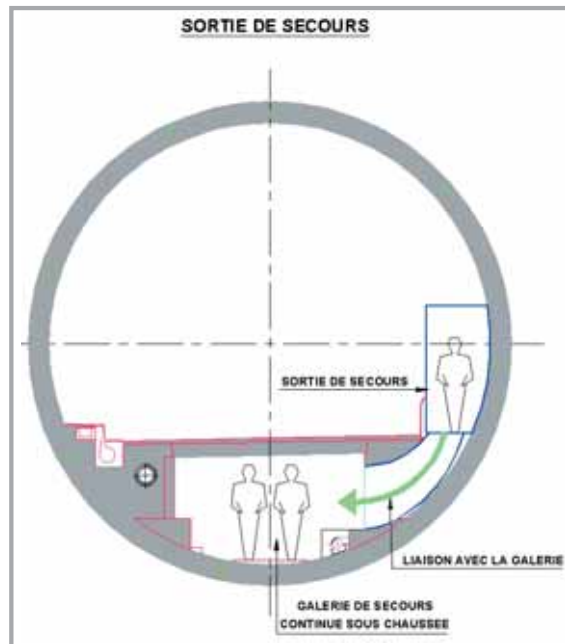


Figure 9  
Coupe transversale au droit du toboggan avec flèche et usager dans la galerie

*Cross section at the level of the chute with arrow and user in the gallery*



Photo 4  
La cabine du toboggan  
*The chute cabin*

une capacité des toboggans de 10 pers./minute (testée sur site), il est apparu adapté d'aménager une issue de secours tous les 100 m.

### La création d'un système complet pour les secours

Autour des toboggans sont regroupés tous les éléments qui contribuent à la sécurité des usagers depuis le cas courant de la panne jusqu'à celui de l'évacuation d'urgence. On trouve ainsi d'amont en aval (photo 4) :

- ◆ un demi-garage latéral obtenu par abaissement localisé du trottoir de droite ;
- ◆ un bloc de protection en béton servant de support aux panneaux de signalisation ;
- ◆ une niche de téléphone derrière le bloc de protection ;
- ◆ un espace intermédiaire formant refuge pour les usagers, avec les armoires des extincteurs ;
- ◆ un abri fermé avec une porte coupe-feu vers le toboggan, revêtu du matériau (FB 135) ;
- ◆ un toboggan de 80 cm de diamètre, en acier inoxydable, conduisant à la galerie technique ;
- ◆ un accès, tous les 200 m, pour les équipes de



Photo 3  
Port Said et les cactus  
*Port Said and cactuses*

Figure 10  
Coupe transversale  
au droit de l'accès  
des secours,  
avec flèche

*Cross section  
at the emergency  
access level,  
with arrow*

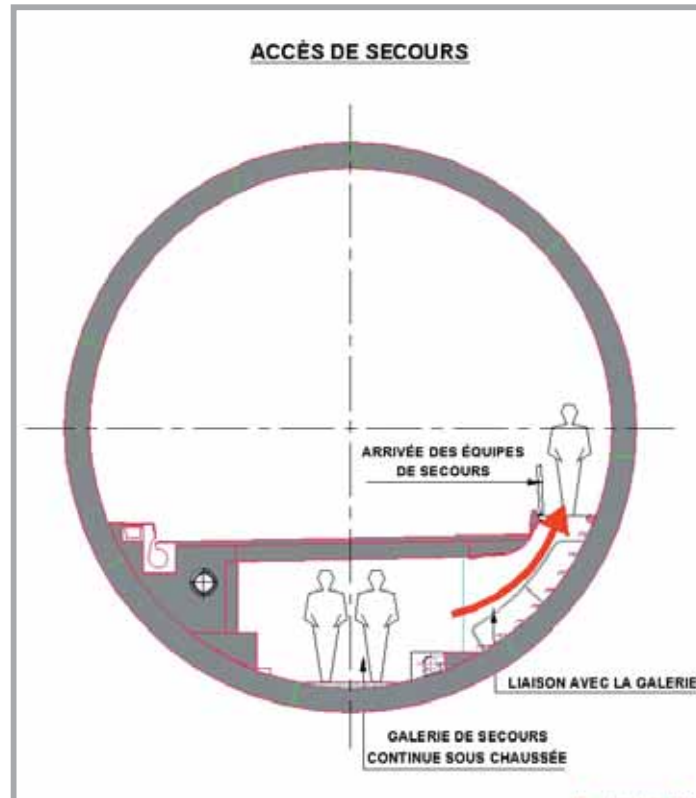
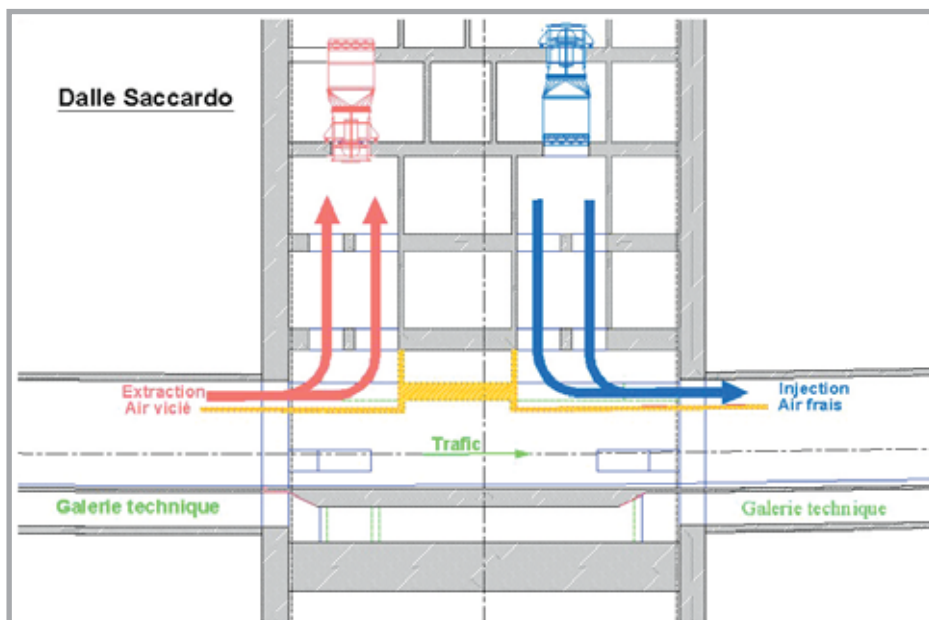


Photo 5  
La galerie  
avec débouché  
du toboggan  
  
*The gallery  
with chute outlet*



Figure 11  
Schéma  
du Saccardo donné  
dans les notices  
de ventilation

*Diagram  
of the Saccardo  
system given  
in the ventilation  
manuals*



secours remontant vers l'espace trafic et s'approchant au plus près du lieu de l'accident ou de l'incendie (figure 10).

◆ une borne incendie, un rouleau souple de raccord de lance.

La galerie de secours sous chaussée est éclairée, sonorisée, surveillée par caméras et en surpression pour ne pas être enfumée. Elle rejoint les itinéraires d'évacuation au droit de chacune des stations (photo 5).

Une signalétique a été mise en place, une campagne d'information a été organisée par le canal de la télévision, pour les futurs usagers des tunnels de El Azhar. Car ce sont les réactions du public durant les premières minutes, voire les premières secondes, qui seront vitales.

## LES ÉQUIPEMENTS D'EXPLOITATION ET DE SÉCURITÉ

L'équipement des tunnels doit satisfaire les besoins d'une circulation dense, pouvant atteindre en pointe 60 000 véhicules/jour (deux sens cumulés) avec des pannes fréquentes.

### Ventilation des tunnels

Elle est une des originalités du projet. Le système combine les principes de ventilation type Saccardo avec des accélérateurs aux extrémités des tunnels. Il consiste, à partir des stations de ventilation espacées de 800 m, à extraire et insuffler les volumes d'air nécessaires pour satisfaire les exigences sanitaires. Les débits d'extraction et d'insufflation contribuent à créer un mouvement longitudinal de l'air dans le tunnel. Les accélérateurs aux extrémités renforcent cette capacité. La gestion normale se fait de manière automatique en fonction des mesures des opacimètres et détecteurs CO (figure 11).

Dans le cas du désenfumage, les ventilateurs d'extraction et ceux d'insufflation en position inversée peuvent voir leurs actions se combiner avec celles des accélérateurs, de manière à maintenir une stratification des fumées pendant le temps d'évacuation. Après cette phase, le système procède au désenfumage massif par poussée longitudinale d'air frais.

Cette ventilation mobilise :

- ◆ dans chaque station intermédiaire, 12 ventilateurs de 200 kW, débit unitaire égal à 100 m<sup>3</sup>/s ;
- ◆ dans chaque station d'extrémité, deux ventilateurs 75 kW, débit unitaire égal à 75 m<sup>3</sup>/s ;
- ◆ dans les tunnels eux-mêmes, 13 accélérateurs au nord, 12 accélérateurs au sud, de 45 kW.

Une ventilation auxiliaire crée une légère surpression dans la galerie technique pour la protéger de toute intrusion d'air enfumé.

## Equipements de gestion du trafic et d'appel de secours

Ils comprennent :

- ◆ le réseau d'appel d'urgence (RAU) avec des bornes d'appel proches des issues tous les 100 m ;
- ◆ le réseau téléphonique de service et radio en liaison avec la police, et les pompiers ;
- ◆ le contrôle d'accès aux entrées des tunnels par les policiers et contrôles de gabarit par détecteurs ;
- ◆ les signaux d'affectation de voies ;
- ◆ les panneaux lumineux sur les blocs de sécurité, renforcés par des flashes en cas d'urgence ;
- ◆ les installations de comptage des véhicules.

## Surveillance des tunnels

Dans l'espace trafic 71 caméras de télévision couvrent la totalité des deux itinéraires.

Au poste de contrôle les images sont affichées de manière cyclique sur les 14 moniteurs.

Dans la galerie technique 35 caméras permettent de surveiller les mouvements de personnel.

## Lutte contre l'incendie

Les dispositifs suivants ont été installés :

- ◆ un câble en tunnel (1 détecteur/4 m) et un câble dans la galerie (1 détecteur/8 m) ;
- ◆ des détecteurs classiques dans les locaux des stations ;
- ◆ dans les tunnels 80 bornes d'incendie (tous les 50 m), avec des rouleaux de tuyaux souples ;
- ◆ à proximité des bouches d'incendie et des refuges téléphone, des extincteurs.

## Energie et éclairage

Ces postes comportent :

- ◆ 4 branchements sur le réseau urbain et une source de secours (quatre groupes de 2 MW) ;
- ◆ un éclairage apporté par une file d'appareils 70 W sodium HP, renforcé aux extrémités ;
- ◆ un balisage constitué d'une file de spots placés le long de la voie de gauche.

## Climatisation des locaux techniques

Les stations souterraines sont équipées d'un système de climatisation composé pour chacune de deux compresseurs de 200 kVA extérieurs pour limiter la température maximale à 35 °C afin de ne pas troubler, par échauffement excessif, le bon fonctionnement des équipements.

## Collecte des eaux

Les tunnels comportent trois stations principales de collecte des eaux de chaussée et d'infiltration.

Nature des travaux	U	Tunnels forés	Puits (entrée sortie) TBM	Stations de ventilation intermédiaires	Sections en tranchées	Quantités totales
Tube Nord	ML	1697	92 + 64	22 + 22	488 + 268	2653
Tube Sud	ML	1696	93 + 59	22 + 22	511 + 245	2648
Parois moulées	M2		28000	41800	42500	112300
Parois moulées, béton	M3		31000	51000	30000	112000
Panneaux de blocs BI/BO	M3			30800		30800
Injections, forages	ML		50200	56500	30500	137200
Injections, volumes	M3		22600	25000	9500	57100
Excavations	M3	223400	73400	110500	146400	553700
Béton préfabriqué	M3	37400				37400
Béton in situ (hors parois)	M3	8850	11300	26550	25000	71700
Armatures	T	1300	4000	6000	5200	16500
Protection au feu F135	M2	55130		850		55980
Caniveaux de drainage	ML	6750	280	250	2720	10000
Caniveaux techniques	ML	5100	340	240	3700	9380
Chaussées	M2	20360	2100	620	9100	32200

Tableau I  
Les principales quantités  
Mains quantities

En cas d'accident, les effluents pollués sont stockés dans des réservoirs tampons ventilés.

## Gestion technique centralisée (GTC ou Scada) et centre de contrôle

Le centre de contrôle est équipé d'une GTC conçue de manière à :

- ◆ déclencher automatiquement les modes opératoires normaux ;
- ◆ autoriser l'intervention des opérateurs pour faire face à des cas particuliers ou de maintenance ;
- ◆ reporter la quasi-totalité des défauts pouvant survenir, et donner une vision synthétique des systèmes en cours de fonctionnement.

L'ensemble de ces objectifs implique un système traitant les informations émises par 9 000 points.

## ■ LA CONSTRUCTION

### Les travaux de parois et d'injections

Ces travaux ont mis en œuvre environ 138 000 m<sup>2</sup> de parois moulées, 137 km de forages pour l'injection de 29 000 m<sup>3</sup> de terrains, 28 000 m<sup>3</sup> de jet grouting. Le premier chantier à organiser est celui des parois. Sa mobilisation se fait dès le mois de juin 1998, tandis que le projet cherche encore sa voie. Les difficultés rencontrées pour les injections de la station de El Hussein, vont conduire à réviser, en cours de travaux et de manière fondamentale, les options d'origine.

### Les enceintes des stations de ventilation

Les enceintes sont des doubles boîtes, de 35 m x 24 m, séparées par une paroi moulée commune. Leur profondeur varie de 30 m (station de El Hussein) à 37 m (station de Port Said). Les structures

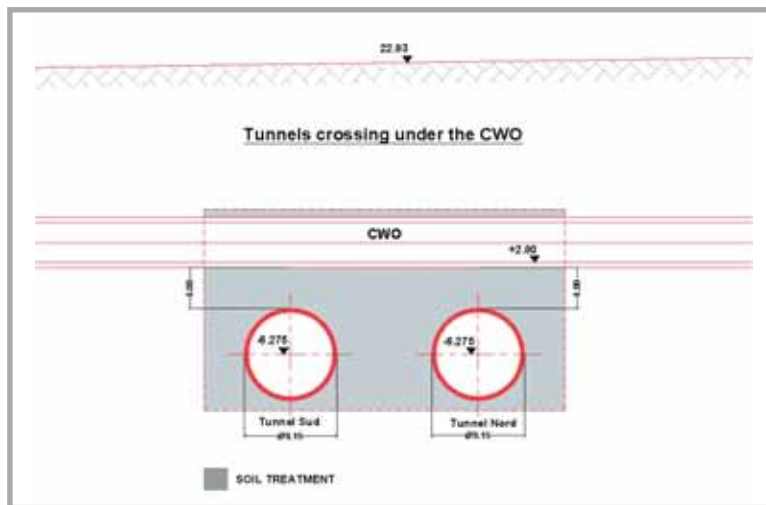
Photo 6  
Les ateliers d'injection  
à El Hussein  
*Injection equipment  
at El Hussein*



Photo 7  
L'hydrofraise  
à Port Said  
en action  
*The hydro-cutter  
in action  
at Port Said*



Figure 12  
Coupe au droit  
du traitement  
de terrain du CWO  
*Cross section  
at the CWO  
ground surfacing level*



sont réalisées par la technique classique de bétonnage des planchers en descendant, au fur et à mesure des terrassements, avec plusieurs lits de butons provisoires dans les niveaux inférieurs, enlevés avant passage du tunnelier.

Les profondeurs et charges d'eau très importantes (25 m à El Hussein, 35 m à Port Said) expliquent les épaisseurs de 1,2 et 1,5 m des parois moulées, qui constituent les soutènements permanents de ces structures exceptionnellement sollicitées. En fond de fouille la solution classique consiste en des massifs profonds injectés, pour assurer l'équilibre des sous-pressions. Les sondages ayant révélé des couches d'argiles profondes, la décision

fut prise, en cours de travaux, d'un audacieux changement du parti technique, consistant à supprimer les radiers injectés et à les remplacer par les dispositions suivantes :

- ◆ pour la station El Hussein, les parois déjà exécutées sont prolongées par une jupe injectée (combinaison de colonnes de jet grouting et d'injections) entre les profondeurs 56 m et 67 m ;

- ◆ pour la station Port Said, la paroi moulée est descendue jusqu'à 87 m de profondeur, pour recouper une série verticale d'alternances sablo-argileuses. Seule une hydrofraise 8000, équipée d'un système de contrôle de verticalité assisté par gyroscope, était capable d'assurer une telle prestation (en particulier pour mordre le béton des panneaux avec une précision < 0,5 % à 90 m de profondeur).

La conception des entrées-sorties du tunnelier dans les stations est héritée des projets du métro. L'expérience a montré que la maîtrise des problèmes hydrauliques, dans les sables du Caire, passe par la dissociation de la fonction de consolidation de celle d'étanchéité. Les principes de base utilisés sont les suivants :

- ◆ exécution d'une enceinte périphérique, constituée d'une paroi au coulis ou en béton plastique ;
- ◆ exécution d'un massif résistant (environ 3 MPa) à l'intérieur de cette boîte étanche que le tunnelier traversera. Ce massif est réalisé soit en jet grouting comme à El Hussein (photo 6), soit au moyen d'un bloc de béton plastique constitué de parois jointives comme à Port Said.

Ces choix ont impliqué la mobilisation d'un outillage exceptionnel confiné sur des sites exigus (photo 7).

## La consolidation des terrains sous les ouvrages proches

Plusieurs structures sensibles voisines des itinéraires du tunnelier devaient être protégées ;

- ◆ passage sous le collecteur de Port Said : une garde de 4 m ne suffisait pas à garantir un tassement maximum de 10 mm sous ce collecteur très important (5 m de diamètre). La solution choisie, pour la consolidation du sol, est un coulis à base de micro-ciment Microsol, présentant des caractéristiques granulométriques compatibles avec celles des sables rencontrés à la profondeur du projet (figure 12) ;

- ◆ puits de sortie et passage le long du collecteur sous la place d'Attaba : sur ce site, les obstacles se sont conjugués mobilisant une multitude de solutions différentes. Sous l'autopont, un outil spécial a été fabriqué. Sur la place, vingt phases ont été nécessaires pour les basculements de réseaux ou de circulation. En bordure du projet un collecteur à 15 m de profondeur longe la paroi à moins d'un mètre de distance (injections de Microsol). Ailleurs ce sont les panneaux à exécuter au ras des fondations des piles de l'autopont en service (ren-

forts des fondations des piles par des colonnes de jet grouting).

### Le creusement du tunnel foré

Les tunnels ont été forés avec un tunnelier Herrenknecht à pression de confinement de boue bentonitique. Cet outil avait été fabriqué pour la construction de la ligne 2 du métro.

Le parcours du tunnelier, pour le tube nord, sera jalonné de multiples événements dont les plus marquants sont rappelés ci-après. Ils témoignent de l'imbrication extrême d'un ensemble de tâches, toutes critiques :

- ◆ janvier à mars 1999, creusement des 450 premiers mètres (photo 8) ;
- ◆ mars à mai 1999, suspension du creusement, car la station de El Hussein ne peut accueillir le TBM à cause du retard lié aux difficultés d'injection rencontrées. Une paroi est exécutée face au TBM. La roue de coupe peut ainsi venir s'y bloquer et la pression redescendre ;
- ◆ juillet, bon avancement entre les stations de El Hussein et Port Saïd ;
- ◆ août, nouvel arrêt sous le collecteur de la rue Port Saïd, car la roue de coupe a souffert en entrant dans le massif de consolidation exécuté autour de l'émissaire. Des rognons très durs ont été enchâssés et ont usé la roue comme une râpe ;
- ◆ fin août, après ce passage difficile, le TBM entre dans le massif du break-out de la station de Port Saïd. On y achève la réparation de la roue, grâce à un puits creusé dans ce massif ;
- ◆ la traversée de la station de Port Saïd elle-même se fait "en aveugle", car les planchers des différents niveaux n'ont pu être achevés avant l'arrivée du tunnelier ;
- ◆ le mois de septembre 1999 verra l'achèvement du creusement du tunnel nord, avec une très bonne cadence en fin de parcours d'environ 16 ml/jour. Les opérations de transfert du TBM pour le creusement du tunnel sud, rendues difficiles par le contexte urbain de la place d'Attaba, dureront ensuite pratiquement quatre mois (photo 9). Le creusement recommence en janvier 2000, un an après le début de celui du nord. Le parcours est plus régulier, car excavations et planchers dans les stations sont terminés :
- ◆ en un mois le TBM atteint la station El Hussein, qu'il traverse à la mi-février 2000 ;
- ◆ deux mois plus tard il arrive à la station Port Saïd. Là, une difficulté majeure survient. Malgré les précautions prises au moment de l'entrée du TBM dans la station, l'eau sous pression réussit à trouver un cheminement et entraîne un volume de matériaux de plus de 100 m<sup>3</sup>. Deux jours plus tard cet incident remontera à la surface, et se traduira par un fontis important ;
- ◆ le TBM repart à la mi-mai pour achever le creusement à la fin du même mois.



Photo 8  
Roue de coupe à Darassa  
Cutting wheel at Darassa



Photo 9  
Les grues à Attaba  
The cranes at Attaba

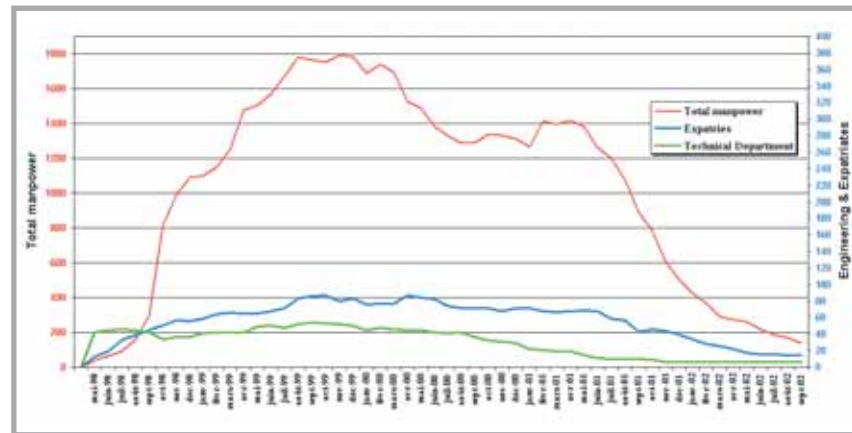


Figure 13  
Evolution des effectifs  
Workforce evolution

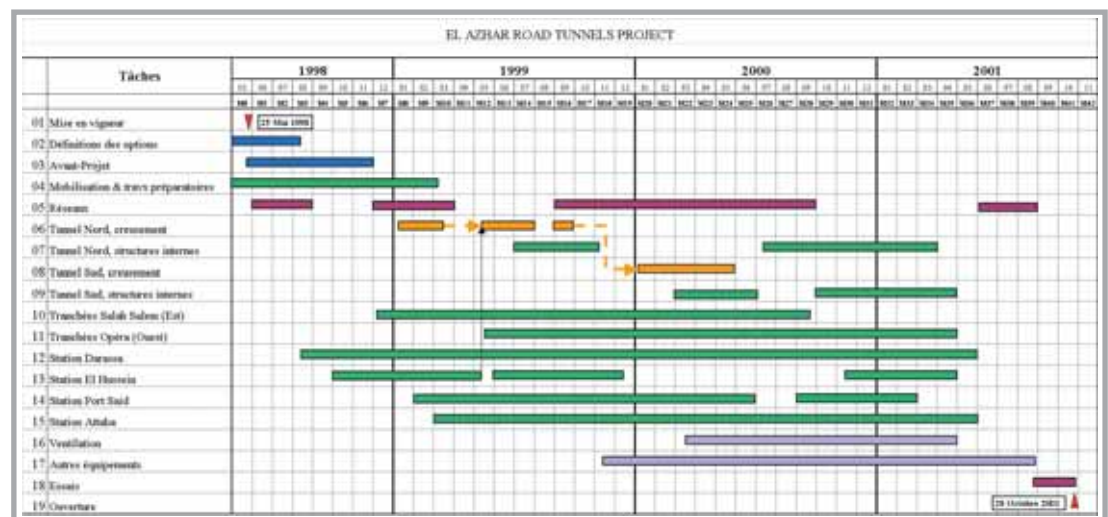


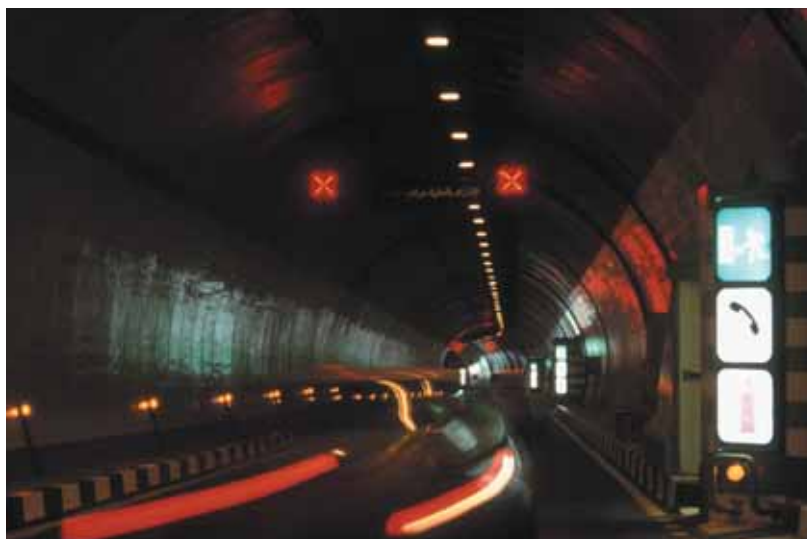
Figure 14  
Planning des travaux  
Work schedule

### Les moyens

La courbe jointe donne l'évolution des effectifs pendant la durée du chantier (figure 13).

### Les étapes d'une course de vitesse (figure 14)

Le projet avait été lancé avec l'intention d'ouvrir le tunnel nord en 2000, un an avant le tunnel sud. ▶



Le tunnel achevé  
*The completed tunnel*

Les impératifs de sécurité, conjugués avec la suspension des travaux pendant un an à El Hussein, ont conduit à n'ouvrir qu'une fois les deux tunnels achevés.

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### *Groupement pilote*

- Campenon Bernard SGE (VINCI Construction) (pilote)
- Arab Contractors (copilote)
- Bouygues TP
- Eiffage
- Spie Batignolles TP

#### *Entreprises spécialisées*

- Solétanche Bachy (parois moulées et injections)
- Spie Enertrans (distribution d'énergie, télécommunications, GTC)
- Seitha (ventilation des tunnels et des espaces de secours)
- Forclum (groupes de secours, climatisation, lots mécaniques)
- Intertectra (étanchéités et revêtement de protection incendie du tunnel)

#### *Expertises, bureaux d'études et consultants*

- Cetu (aspects trafic, fonctionnalités, sécurité)
- Scetauroute (conception et contrôle des équipements)
- Bonnard et Gardel (simulations des scénarios d'incendie)
- Hamza (analyses géotechniques détaillées, confortements)
- Simecsol (analyses géotechniques préliminaires)
- Europe Etudes Gecti (géométrie générale, assainissement)
- Eurovia (études des chaussées)

#### *Architectes*

- Charles Lavigne
- Gamal Bakry

### ABSTRACT

The El Azhar tunnels. A new generation of road tunnels

*Various authors*

To alleviate traffic in the streets of the El Azhar mosque district, and thus help enhance the value of the architectural treasures left by the Fatimids, the Egyptian authorities in 1998 decided to establish an underground link between eastern Cairo and the Opera Square.

This structure is under the authority of the NAT (National Authority for Tunnels), and on 5 April 1998 a Design and Build Contract was signed with the French-Egyptian consortium led by Vinci Construction Grands Projets and Arab Contractors, for the construction of these road tunnels 2.5 km long.

The special features of the structure are due to the difficulties of inserting it in the subsoil of old Cairo, the new measures taken to protect the users and structures in case of fire, and the record completion time of 40 months.

### RESUMEN ESPAÑOL

Los túneles de El Azhar. Una nueva generación de túneles viarios

*Autores diversos*

Con objeto de disminuir el tráfico rodado en las calles de la mezquita El Azhar y, de este modo, valorizar los tesoros arquitectónicos dejados por los Fatimidas, las autoridades egipcias tomaron la decisión, en 1998, de construir un enlace subterráneo entre el este de El Cairo y la plaza de la Ópera.

Esta estructura, depende de la autoridad de la NAT (National Authority for Tunnels), habiéndose formalizado un contrato fechado el 5 de abril de 1998, para el diseño y construcción, por parte del consorcio franco-egipcio encabezado por Vinci Construction Grands Projets y Arab Contractors, con destino a la ejecución de estos túneles viarios de 2,5 km de longitud.

Las particularidades de esta estructura se derivan de las dificultades de su inserción en el subsuelo de la parte antigua de El Cairo, a las nuevas medidas tomadas para la protección de los usuarios y de las propias estructuras en caso de incendio, y ello en un plazo récord de 40 meses.

# Le viaduc de Millau

Le viaduc de Millau est un ouvrage de 320 millions d'euros (2,1 milliards de francs) financé et réalisé par le groupe Eiffage dans le cadre d'une concession. Sa filiale, la Compagnie Eiffage du viaduc de Millau, est concessionnaire de l'ouvrage pour 75 ans. Ce viaduc, d'une hauteur de 343 m au sommet des pylônes, est le dernier maillon de l'autoroute A75 Clermont-Ferrand/Béziers. La recherche d'un ouvrage esthétique a conduit Michel Virlogeux, déjà concepteur du pont de Normandie, au principe d'un viaduc multahaubané, composé de piles minces, aux lignes élancées et d'un tablier très léger, effleurant la vallée en sept points seulement (hors culées). La précision requise pour chaque phase technique impose des vérifications multiples notamment par satellite GPS. Le franchissement du viaduc sera payant. Une barrière de péage dont l'avenement sera réalisé en Ceracem (BFUP) sera installée à environ 6 km au nord du viaduc à Saint-Germain.

Jean-Pierre Martin  
DIRECTEUR DE PROJET  
Eiffage TP



Marc Buonomo  
DIRECTEUR  
Eiffel Construction Métallique



Claude Servant  
DIRECTEUR TECHNIQUE  
Eiffage TP



Figure 1  
Organigramme général  
d'Eiffage

General organisation chart  
of Eiffage

La concession de financement, conception, construction, exploitation et entretien du viaduc de Millau a été confiée par l'Etat à la Compagnie Eiffage du viaduc de Millau par décret n° 2001-923 du 8 octobre 2001 paru au Journal Officiel le 10 octobre 2001.

L'organisation du concessionnaire en phase de construction comprend :

- ◆ la maîtrise d'ouvrage qui comporte trois entités :
  - la cellule de conduite d'opération chargée du suivi général du projet,
  - la direction administrative et financière ;
  - la direction de la communication ;
- ◆ la maîtrise d'œuvre ;
- ◆ l'entreprise.

Dès le stade de la construction, l'exploitant est intégré dans l'organisation du concessionnaire pour sa participation à l'élaboration du programme de l'ouvrage et aux opérations de réception.

Le tableau de la figure 1 résume l'organisation générale du projet mise en œuvre.

## PRÉSENTATION DU PROJET

Le viaduc de Millau, ouvrage d'art le plus important, de l'autoroute A75 permet à cette dernière de franchir la vallée du Tarn entre le Causse Rouge au nord et le Causse du Larzac au sud à 5 km à l'ouest de la ville de Millau (photo 1).

La largeur de la brèche qui laisse la vallée du Tarn à 270 m en contrebas de l'autoroute est de 3000 m environ entre rebords de ces deux Causses.

Le viaduc de Millau est un ouvrage exceptionnel multahaubané d'une longueur de 2 460 m, légèrement courbe suivant un cercle en plan de 20000 m

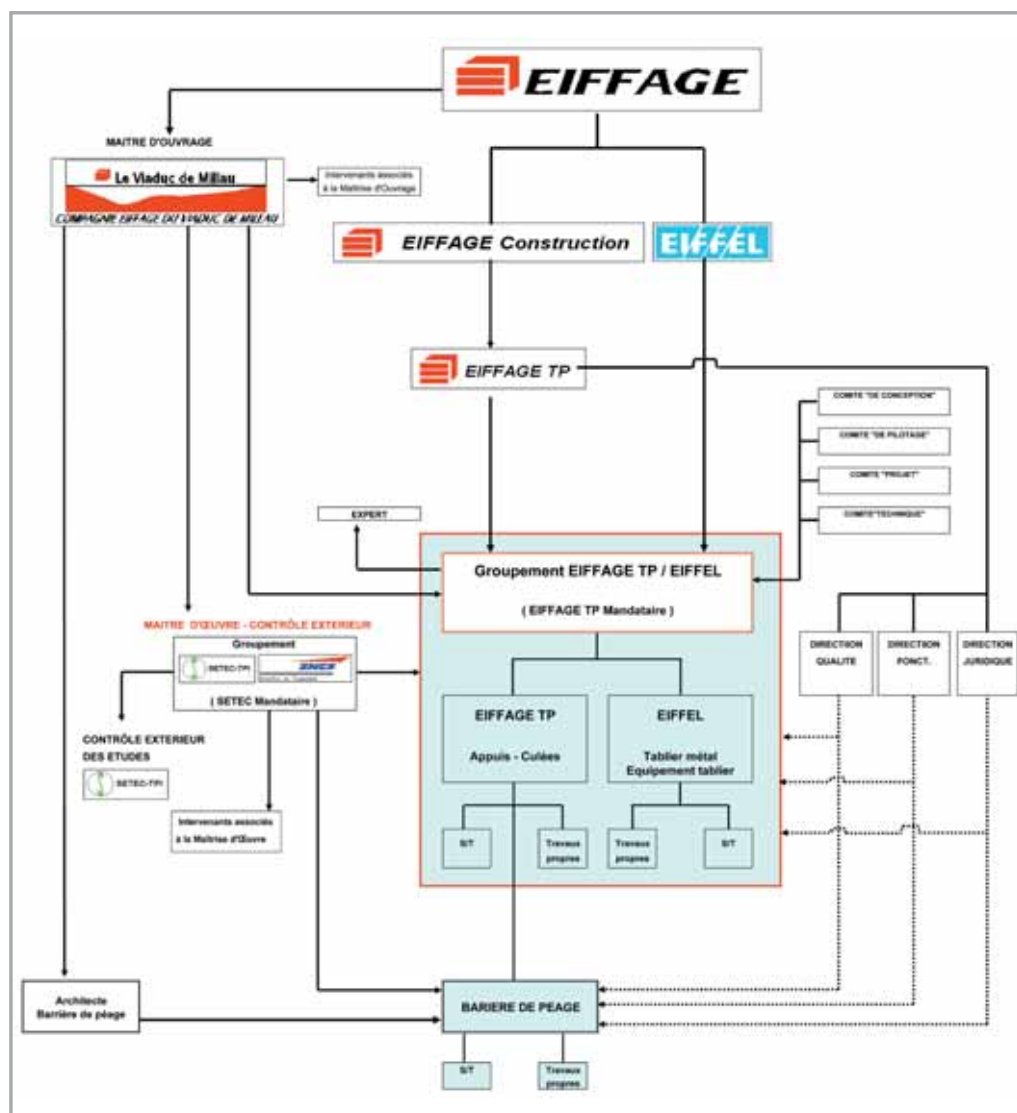
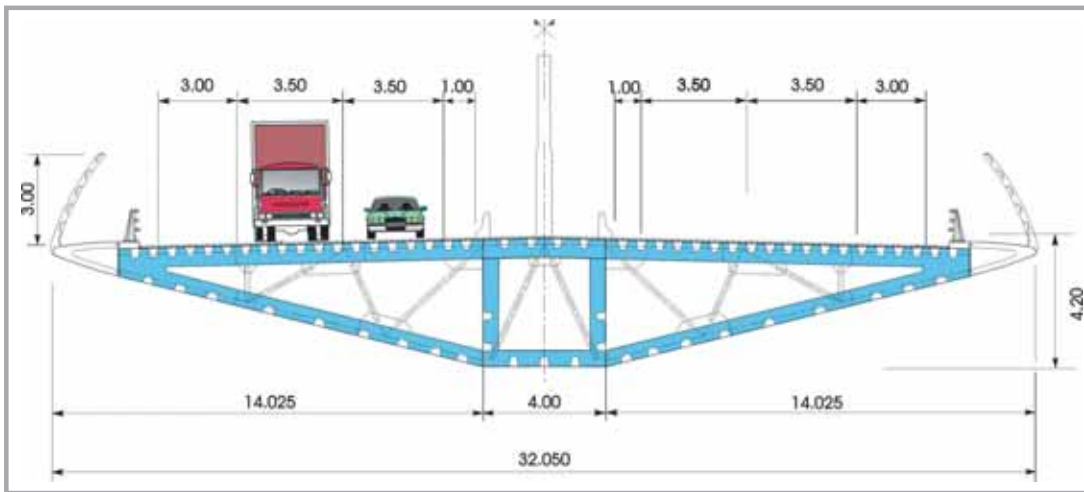


Photo 1  
Photomontage  
du viaduc

Photomontage  
of the viaduct



Figure 2  
Coupe transversale  
fonctionnelle du tablier  
Functional cross section  
of the deck



ge le record du monde de longueur des ponts à haubans à travées multiples à nappe axiale ainsi que celui de hauteur de piles.

## LE SITE ET LES CONTRAINTES

Depuis le Causse Rouge au nord vers le Causse du Larzac au sud, le viaduc de Millau franchit successivement les reliefs suivants :

- ◆ le versant sud du Puech d'Ausset, en pente régulière de 40 % représentant une dénivellée de 240 m environ sur une longueur de 600 m ;
- ◆ le fond de la vallée du Tarn sur une longueur de 200 m environ dans laquelle le lit mineur du Tarn occupe 60 m (suivant le biais) ;
- ◆ un versant rive gauche du Tarn surcreusé par un petit thalweg serpentant sous le viaduc et qui présente une dénivellée de 125 m sur une longueur de 280 m environ ;
- ◆ le plateau de France sur une longueur de 1 000 m environ suivant une pente moyenne qui varie de 7 % au nord au voisinage du rebord de la vallée du Tarn à 17 % (30 % suivant la ligne de plus grande pente) au sud à l'approche du versant du Causse du Larzac ;
- ◆ le versant du Caussonus franchi très en biais sur une longueur de 400 m, dont la pente suivant la ligne la plus grande peut atteindre presque 1/1 à l'approche de la culée et qui comporte certains passages très abrupts.

L'ouvrage franchit en outre les voies de communication suivantes :

- ◆ la RD 992 reliant Millau à Saint-Affrique ;
- ◆ la RD 41 reliant Millau au village de Peyre dans le fond de la vallée du Tarn ;
- ◆ la voie ferrée électrifiée Clermont-Ferrand/Béziers elle-même accolée à la RD 41.

La forte complexité de ce site, qui rend difficile l'accès aux zones de forte pente, a conduit à limiter le



de rayon à concavité tournée vers l'est, et en rampe constante de 3,025 % du nord vers le sud.

Le profil en travers de l'autoroute est du type 2 x 2 voies de circulation encadrées chacune par une bande d'arrêt d'urgence de 3 m et une bande désaxée de gauche de 1 m.

L'ouvrage est également équipé de barrières lourdes et d'écrans de protection des usagers contre le vent latéral.

La largeur du terre-plein central (4,45 m) a été conditionnée par l'encombrement des dispositifs du haubanage à nappe axiale. Le profil en travers qui résulte de ces contraintes conduit à une largeur totale de tablier de 27,75 m se décomposant en (figure 2) :

- ◆ BAU : 3,00 m ;
- ◆ chaussée nord-sud : 7,00 m ;
- ◆ BDG : 1,00 m ;
- ◆ TPC : 4,45 m ;
- ◆ BDG : 1,00 m ;
- ◆ chaussée sud-nord : 7,00 m ;
- ◆ BAU : 3,00 m.

De telles caractéristiques confèrent à cet ouvra-

## CONCESSION ÉLÉMENTS CLÉS

- Concédant : Etat
- Concessionnaire : Compagnie Eiffage du viaduc de Millau. Filiale à 100 % d'Eiffage
- Durée : 78 ans incluant la durée de la construction
- Mise en service prévue : début 2005

Tarifs (novembre 2000)

Eté

V.L. (TTC) : 6,10 €

P.L. (TTC) : 19,06 €

Hiver

V.L. (TTC) : 4,57 €

P.L. (TTC) : 19,06 €



nombre des piles et à les implanter soit en tête soit en pied de versant.

L'ensemble du site est constitué de formations secondaires composées de calcaires, de marno-calcaires et de marnes qui sont recouvertes par des éboulis et des colluvions récents sur des épaisseurs variables jusqu'à 10 m.

Du point de vue géologique, les fondations reposent sur deux grands types de roches (figure 3) :

- ◆ des calcaires pour les culées C0 et C8 ainsi que pour les piles P1, P2, P3 et P4 ;

- ◆ des marnes pour les autres piles P5, P6 et P7.

Sur le plan géotechnique, les principales difficultés ont été rencontrées dans les calcaires qui présentaient, en plus des karsts et des remplissages d'argile, une grande fracturation tandis que les marnes, en dehors de la partie superficielle altérée, se sont révélées très peu fissurées, homogènes et compactes.

Les deux zones de failles, celle du versant sud entre les marnes et les calcaires ainsi que celle située au-delà de la culée C0 sur le versant nord, ont désorganisé les roches sur de larges zones et entraîné des adaptations importantes des fondations de la pile P4 (traitement du rocher ainsi qu'un approfondissement et un élargissement de la base des puits) et de la culée C0 (passage d'une fondation superficielle à une fondation mixte avec un puits). La couverture de colluvions et de marnes altérées au-dessus des marnes compactes s'est révélée en limite de stabilité et propre à déclencher des glissements qui se sont produits l'un à proximité immédiate de la plate-forme de P7 et l'autre sur le talus amont de la plate-forme de la palée provisoire π5.

De même les épaisseurs des éboulis dans la pente au-dessus du substratum rocheux de la pile P3 étaient beaucoup plus importantes à l'ouest du thalweg (6 à 8 m au lieu des 4 m prévus). Elles ont nécessité de remplacer un talus par une grande paroi clouée et de modifier la fondation et son comportement vis-à-vis des efforts horizontaux.

## LE CONCEPT

La conception générale du viaduc de Millau résulte de la recherche d'une adéquation entre les différentes contraintes imposées par le site et les considérations techniques et architecturales : ouvrage le plus léger et le plus élégant possible afin de minimiser son impact sur le site et faire en sorte que le viaduc touche le moins possible le sol pour rendre plus facile la protection du paysage. Le choix d'un tablier métallique découle de la logique d'un tablier mince haubané qui offre le moins de prise aux vents violents existant à une telle hauteur au-dessus du sol.

Les piles et les pylônes participent à la résistance en flexion longitudinale.

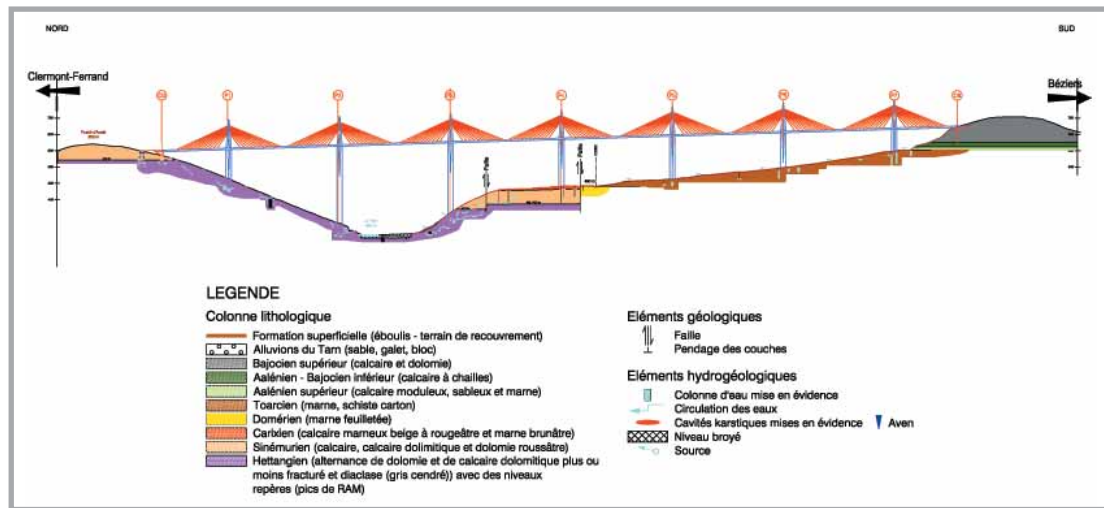


Figure 3  
Profil géotechnique des terrains rencontrés  
*Geotechnical profile of the land types encountered*

Afin de résister aux alternances des moments dues à la succession de grandes portées, les piles sont constituées d'un fût unique en forme de caisson dans sa partie basse qui se dédouble dans sa partie supérieure. Les pylônes sont métalliques et en forme de "Y" renversé orienté longitudinalement et dans le prolongement des fûts dédoublés des piles. La liaison pylône-tablier est un encastrement réalisé par une entretoise métallique dans le tablier au droit de chaque jambe de pylône. Le choix de la forme dédoublée des fûts en tête des piles permet ainsi de résoudre les problèmes délicats de la dilatation thermique.

Chaque travée est supportée par l'intermédiaire de haubans ancrés de part et d'autre des pylônes. Le haubanage en nappe axiale, comporte onze haubans par nappe, disposés en semi-éventail et espacés de 12,51 m.

L'ouvrage est un ouvrage continu constitué de huit travées haubanées : deux travées de rive de 204 m de portée et six travées courantes de 342 m de portée chacune. Les piles ont des hauteurs variables en fonction de la topographie du site et du profil en long de l'ouvrage :

- ◆ P1 : 94,50 m ;
- ◆ P2 : 244,96 m ;
- ◆ P3 : 221,05 m ;
- ◆ P4 : 144,21 m ;
- ◆ P5 : 136,42 m ;
- ◆ P6 : 111,94 m ;
- ◆ P7 : 77,56 m.

Les dimensions en plan des piles sont variables sur toute la hauteur afin de suivre l'importance des moments de flexion les sollicitant. Dans le sens longitudinal de l'ouvrage, la dimension en plan est sensiblement constante (variable de 16 à 17 m). Dans le sens transversal, la largeur des piles varie de 10 m en tête à 27 m au pied de la pile la plus haute. De même dans la partie dédoublée des fûts, la "largeur" de ces fûts parallèlement à l'axe de l'ouvrage varie de 5 m en tête à 8,60 m à la base (figure 4).

Le tablier repose sur toutes les piles par l'intermédiaire d'appareils d'appuis sphériques formant une liaison de type rotule.

Afin d'éviter tout soulèvement aux états limites de

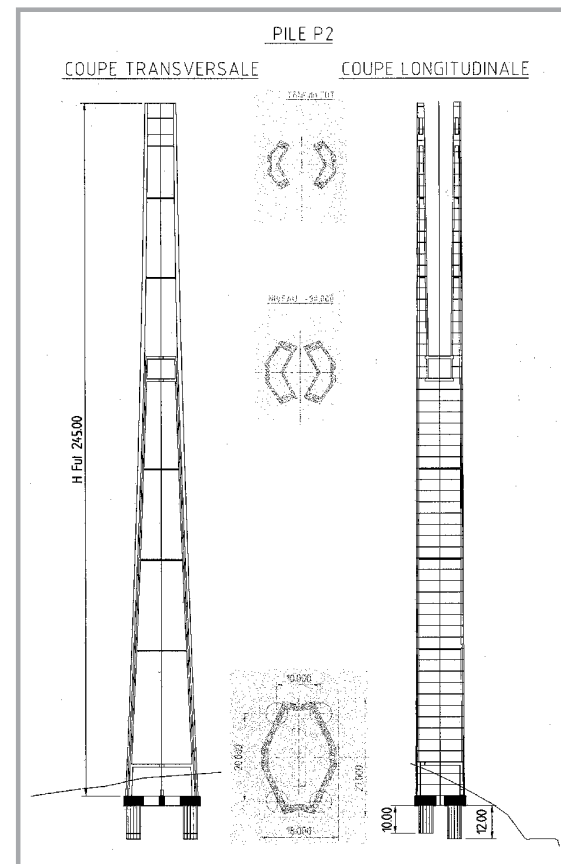


Figure 4  
Coffrage de la pile P2  
*Shuttering for pier P2*

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### Concédant

Etat représenté par RCA et par AIOA

### Maître d'ouvrage

Compagnie Eiffage du viaduc de Millau

### Maître d'œuvre

Groupe Setec - SNCF

### Entreprise lot génie civil (mandataire)

Eiffage TP

### Entreprise lot métal

Eiffel Construction Métallique

### Bureaux d'études d'exécution

#### Lot génie civil

- STOA Eiffage TP
- EEG-Simecsol (+ Thales + SERF)

#### Lot métal

Greisch Ingénierie

### Principaux sous-traitants du lot génie civil

- Terrassement : Fougerolle-Ballot/La Forezienne
- Armatures passives : SAMT - Germain
- Grues à tour : Potain
- Coffrages piles : Péri
- Centrales à béton : SATM - BCP
- Laboratoire béton : Sigma Béton
- Ascenseurs : Intervect
- Soutètements provisoires : Teras-tic/SATS - STIPS - SOD

### Principaux sous-traitants du lot métal

- Etanchéité, couche de roulement : Appia
- Aciers : Arcelor
- Haubans : Freyssinet International
- Cages de télescopes : Plauen
- Palées provisoires : Munch
- Pylônes : Munch/Sécometal
- Appareils d'appuis, balancelles, joints de chaussée : Maurer
- Vérins, hydraulique : Enerpac

### Architecte

Cabinet Foster

service, les appareils d'appuis sont cloués sur les piles à l'aide de câbles de précontrainte.

Afin de réduire les densités d'armatures passives en tête et retarder la fissuration, les fûts dédoublés des piles sont précontraints sur toute leur hauteur à l'aide de huit câbles 19 T 15 S.

Toutes les piles reposent sur un système de fondation semi-profonde constitué par une semelle rectangulaire de 3,5 m à 5 m d'épaisseur surmontant quatre puits marocains de 5 m de diamètre et de 9 à 16 m de longueur ancrés dans le substratum rocheux.

La hauteur totale des pylônes est de 87 m. Les jambes du "Y" ont une hauteur de 38 m et elles sont constituées par deux caissons métalliques raidis dont la dimension transversale est de 3,50 m et la dimension longitudinale de 4,75 m. Chaque jambe de pylône est surmontée par un mât de hauteur 49 m dans lequel sont ancrés les haubans. La dimension transversale du mât est identique à celle des jambes de pylônes et la dimension longitudinale est variable de 9,70 m à sa base à 2,40 m à son sommet.

Le tablier est constitué d'un caisson métallique trapézoïdal de 4,20 m de hauteur maximale à l'axe avec un platelage supérieur orthotrope constitué de tôles de 12 à 14 mm d'épaisseur en partie courante (14 mm sous la voie lente).

Le raidissage transversal du tablier est assuré par des diaphragmes en treillis espacés de 4,17 m en zone courante. Le raidissage longitudinal est assuré par des augets traversant les diaphragmes. Deux âmes verticales espacées de 4 m règnent sur toute la longueur de l'ouvrage de façon à reprendre les charges localisées des appuis provisoires de lancement au cours du lancement de l'ouvrage.

## LES ÉTUDES ET LES ESSAIS

### Les études d'exécution

Le groupement d'entreprises Eiffage TP - Eiffel Construction Métallique a mis en place, sous l'autorité du directeur de projet, un directeur technique chargé de veiller à la cohérence des choix techniques et à l'adéquation du déroulement des études techniques et des méthodes avec le bon avancement du chantier.

L'importance exceptionnelle de l'affaire a conduit à mettre en place un adjoint au directeur technique dont le rôle était tenu par le coordinateur études/travaux du lot génie civil (CET). La direction technique est renforcée par trois ingénieurs dont l'un s'occupe exclusivement de la gestion des documents d'études et les deux autres veillent principalement au bon respect des dispositions d'armatures prévues sur les plans lors de la réalisation des travaux de génie civil.

Cette équipe, ainsi que l'ingénieur responsable des

méthodes et quatre projeteurs, a été regroupée dans les bureaux de chantier à Millau.

Les études d'exécution du lot génie civil ont été réalisées sous la direction et la coordination de la direction technique du chantier par un groupement de bureaux d'études, comprenant le bureau d'études de Eiffage TP (STOA) et le bureau d'études EEG-Simecsol et ses sous-traitants Thales et SERF.

La répartition des études d'exécution entre les bureaux d'études était la suivante :

◆ pour EEG-Simecsol : piles P2 à P6 et leurs fondations ;

◆ pour STOA Eiffage TP :

- culées C0 et C8,
- piles P1 et P7,
- fondations des palées provisoires.

Les études d'exécution et de montage du lot charpente métallique ont été réalisées par le bureau d'études Greisch Ingénierie de Liège (Belgique).

Elles portaient sur les parties suivantes de l'ouvrage :

- ◆ tablier, pylônes et haubans ;
- ◆ équipements et superstructures.

Les études d'exécution ont été établies suivant trois phases distinctes :

- ◆ phase 1 : études de stabilité générale ;
- ◆ phase 2 : appuis et fondations ;
- ◆ phase 3 : charpente métallique (tablier, pylônes, haubans, équipements).

Les études de stabilité générale ainsi que les calculs au vent turbulent ont été réalisés par le bureau d'études Greisch à l'aide du logiciel FINELG.

Les études d'exécution ont été contrôlées par le bureau de contrôle extérieur Setec TPI du maître d'œuvre.

Préalablement au démarrage des études d'exécution, le groupe Eiffage avait confié au maître d'œuvre Setec une mission de validation de la solution métallique proposée lors de la remise des offres de concession.

La validation Setec établie sur la base des documents remis par Eiffage à l'autorité concédante a porté pour l'ouvrage en cours d'exploitation sur :

- ◆ les hypothèses de calculs du tablier, des pylônes et haubans ;
- ◆ la flexion longitudinale et les efforts dans les haubans ;
- ◆ les effets du vent ;
- ◆ les effets de fatigue ;
- ◆ les pylônes et la liaison pile-tablier-pylône.

Les études d'exécution, qui se traduisent par l'établissement d'environ 300 notes de calculs et 2600 plans, ont nécessité la mobilisation d'équipes dont l'effectif total a atteint en pointe jusqu'à soixante personnes dont environ vingt-cinq ingénieurs et trente-cinq projeteurs. Elles ont duré, dans leur phase principale, environ dix-huit mois.

La conception et les justifications des dispositions proposées par le groupe Eiffage devaient être d'un niveau au moins équivalent aux options présentées

dans le dossier de projet du concédant (POA) avec les exigences suivantes :

◆ une "durée d'utilisation de projet" du viaduc de cent vingt ans. La "durée d'utilisation du projet" s'entend comme étant la durée pendant laquelle le viaduc doit être utilisé comme prévu, en faisant l'objet de l'entretien et de la maintenance escomptés sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures ;

◆ le respect des règles de dimensionnement définies à l'annexe 4 du cahier des charges de la concession "Instructions applicables au projet et à sa réalisation".

Des revues de conception et de coordination des études avec les bureaux d'études des lots 1 et 2 ainsi que des revues de projet avec le bureau de contrôle extérieur se sont déroulées à intervalles réguliers pour vérifier que le niveau de qualité requis était atteint en particulier en matière de "durée d'utilisation de projet" du viaduc.

L'exercice des contrôles a été effectué à plusieurs niveaux :

◆ les contrôles internes et externes réalisés dans le cadre de l'organisation de chaque bureau d'études, l'ensemble constituant son contrôle intérieur ;

◆ le contrôle extérieur de l'entreprise réalisé par le maître d'œuvre.

Les arbitrages sur les différends techniques qui peuvent naître entre la maîtrise d'œuvre et l'entreprise relèvent de la maîtrise d'ouvrage qui s'est entourée d'experts indépendants. Le concessionnaire a ainsi constitué auprès du maître d'ouvrage un comité technique composé d'ingénieurs de haut niveau de la maîtrise d'œuvre, de l'entreprise et d'experts indépendants dont la compétence et l'expérience dans le domaine des travaux du viaduc de Millau sont mondialement reconnues.

Ce comité se réunissait à intervalle régulier (environ une fois par mois) et fournissait des avis et recommandations sur les questions techniques que lui soumettait le maître d'ouvrage. Les experts indépendants du maître d'ouvrage étaient M. Virlogeux (pour les problèmes de conception générale et d'études au vent en particulier), F. Schlosser (pour les problèmes de géotechnique), J.-C. Fouchiat et J. Piccardi (pour les problèmes de charpente métallique).

Chaque semestre, le maître d'ouvrage fait réaliser par un organisme extérieur (AFAQ), agréé par le concédant, un audit externe. Cet audit concerne tous les acteurs liés à la construction du viaduc de Millau.

## Les études au vent

L'ouvrage étant situé à une très grande hauteur au-dessus de la vallée, les efforts générés dans l'ouvrage par les effets du vent sont les efforts dimensionnants pour la conception et pour la vérification des différentes parties de l'ouvrage. Des

études approfondies des actions du vent sur l'ouvrage ont donc été réalisées dès les études du POA du viaduc en 1997. Elles se sont poursuivies pendant la phase d'appel d'offres de concession puis lors des études d'exécution.

Les études au vent ont été menées de manière complète en s'appuyant sur les dernières connaissances en la matière. Elles ont porté sur :

◆ la reconnaissance des caractéristiques du vent dans le site ;

◆ la détermination du modèle de vent ;

◆ le comportement aérodynamique des différentes parties de l'ouvrage soumises au vent : les piles, le tablier, les pylônes et les palées provisoires de construction ont fait l'objet d'essais réalisés par le CSTB dans la soufflerie de Nantes ;

◆ la détermination des admittances aérodynamiques verticales et horizontales à partir d'un essai aéroélastique de la maquette d'un tronçon d'ouvrage en cours de construction ;

◆ le calcul des efforts et des déplacements dans l'ouvrage. Les effets du vent moyen (par calcul statique) et de la turbulence (par analyse spectrale) ont été étudiés sur l'ouvrage pour différentes configurations en phase d'exploitation et en phase de construction.

Pour l'étude des effets du vent turbulent, l'analyse modale puis la réponse dynamique ont été étudiées avec le logiciel FINELG du bureau d'études Greisch en utilisant les données statistiques de vent et les coefficients aéroélastiques des différents éléments de l'ouvrage. Ce calcul fournit l'écart-type de la réponse pour chaque mode. Le résultat final est obtenu par cumul quadratique des réponses modales pondérées par l'écart-type.

◆ l'évaluation des coefficients de sécurité pour les calculs aux états limites en construction et en service ;

◆ des essais d'efficacité et de sifflement des écrans brise-vent en PMMA.

## Les essais et tests

En plus des essais géotechniques, au vent et courants exigés par les normes sur les matériaux, les fournitures et les équipements à mettre en œuvre, un certain nombre d'essais ont été ou seront réalisés afin de valider la conception et de s'assurer que le niveau de qualité requis est atteint en matière de "durée d'utilisation de projet" du viaduc de 120 ans :

◆ tests de durabilité sur les bétons : essais de perméabilité, porosité, coefficient de diffusion des chlorures, résistance au gel-dégel + sel de déverglaçage, test de gonflement ;

◆ essais de fluage et de retrait du béton ;

◆ test de vieillissement du béton armé par des contrôles destructifs (carbonatation, pénétration de chlorure) sur des blocs exposés aux mêmes conditions d'environnement que le viaduc ;

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS

### *Terrassement*

Plates-formes : 350 000 m<sup>3</sup>

### Génie civil

#### *Puits marocains*

- Béton : 6 000 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 1 200 t

#### *Semelles*

- Béton : 13 000 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 1 300 t

#### *Piles*

- Béton : 53 000 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 10 000 t
- Précontrainte : 200 t

#### *Culées*

- Béton : 5 500 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 550 t

#### *Palées provisoires*

- Béton : 7 500 m<sup>3</sup>
- Aciers passifs : 400 t

### Charpente métallique

#### *Tablier*

- Aciers S 355 : 24 000 t
- Aciers S 460 : 11 000 t

#### *Pylônes*

- Aciers S 355 : 3 200 t
- Aciers S 460 : 1 400 t

**Haubans** : 1 500 t

#### *Palées et chevêtre métalliques provisoires*

- Aciers S 355 : 3 200 t
- Aciers S 460 : 3 200 t

*Cage de télescopage* : 400 t

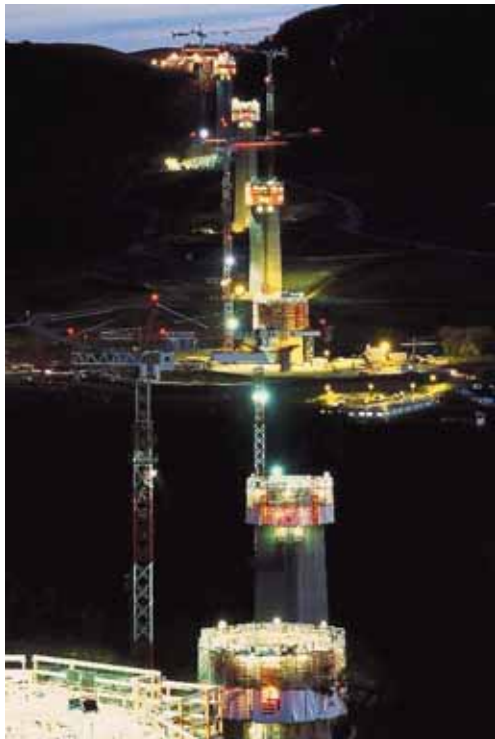


Photo 2  
Vue générale du chantier  
General view of the site

- ◆ essais sur les haubans : fatigue, étanchéité et différents composants ;
- ◆ essais de frottement du matériau DUB pour les appareils d'appuis sphériques des piles ;
- ◆ suivi du comportement des différentes parties de l'ouvrage pendant la construction (puits, semelles, piles et palées provisoires, tablier, pylônes et haubans) ;
- ◆ essais de chargement statiques et dynamiques lors de la réception de l'ouvrage.

## LES MÉTHODES D'EXÉCUTION ET LE DÉROULEMENT DES TRAVAUX

### Appuis et fondations

#### Puits marocains

Les principes retenus sont fonction des terrains rencontrés :

- ◆ en terrain meuble, les parties de puits excavés sont blindées par un "blindage lourd" ;
- ◆ en terrain rocheux, les parties de puits excavés par minage sont blindées par un "blindage léger" .

Chaque puits marocain a été excavé avec des pelles hydrauliques équipées de brise-roche par passes successives de 1,50 m avec confortement successif en béton projeté.

Chaque puits est équipé en tête d'une margelle périphérique en béton armé. Sur une même semelle, les puits sont réalisés deux par deux, par paire située en diagonale.

#### Semelles

Les semelles dont l'épaisseur varie entre 3 m et 5 m sont réalisées de façon traditionnelle à l'aide d'un coffrage sur toute la hauteur qui est maintenu en pied à l'aide de tiges d'ancrages. Les semelles représentent des bétonnages variant de 900 à 2 100 m<sup>3</sup>.

#### Fûts des piles

Les levées de chaque partie des piles, fût unique inférieur et fûts dédoublés en partie supérieure, sont réalisées par hauteur de 4 m. Les coffrages sont du type auto-grimpant pour la partie extérieure et du type semi-grimpant pour l'intérieur. Les trente premiers mètres des piles sont bétonnés à la pompe. Au-delà, le bétonnage est réalisé à la benne (3 m<sup>3</sup>) à l'aide d'une grue à tour de 65 m de flèche et d'une capacité de 20 t maximum (photo 2).

Sur chaque pile, le chantier tourne à deux postes de sept heures. Six outils coffrants sont installés sur le chantier et le cycle de rotation de chaque levée de bétonnage est de 3 jours pour les fûts uniques et de 3 à 4 jours pour les fûts dédoublés en partie haute. Les piles sont réalisées en béton haute performance B60.

#### Tablier

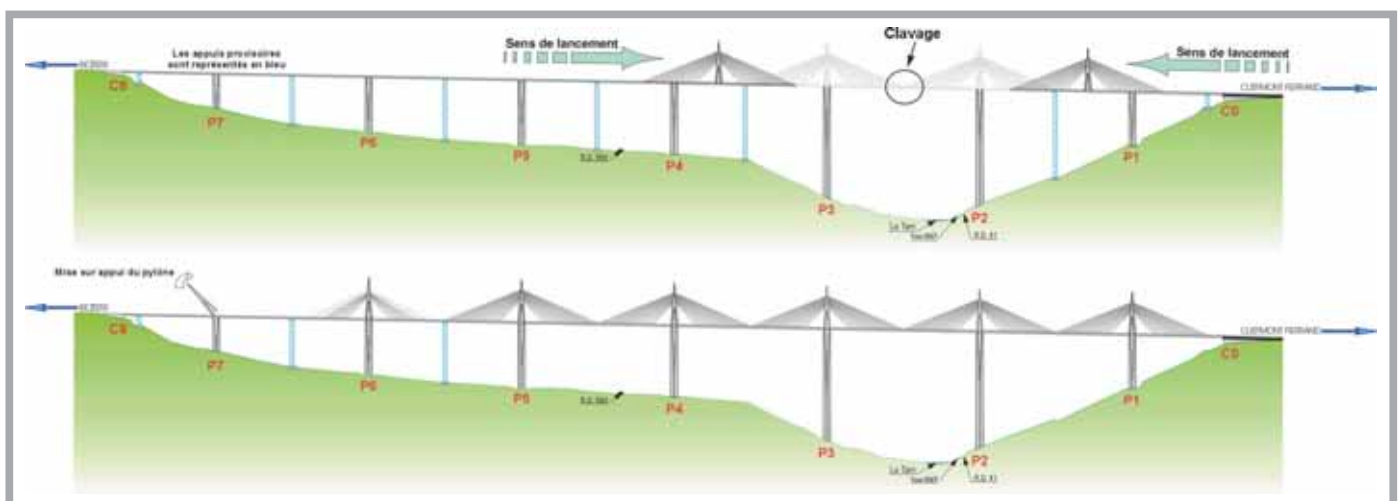
Le tablier métallique de l'ouvrage est réalisé par phases successives d'assemblage et de lancement à partir des plates-formes aménagées derrière les culées C0 et C8 (figure 5).

Depuis la plate-forme côté C8, on réalise une partie d'ouvrage de 1 743 m de longueur de C8 à mi-travée P2-P3. Une autre partie d'ouvrage de 717 m de longueur est réalisée depuis la plate-forme C0.

Le caisson central du tablier est réalisé par élément de 15 à 22 m de longueur d'un poids maximal de 90 t. Les panneaux qui constituent les caissons centraux sont fabriqués dans l'usine Eiffel à Lauterbourg (photo 3) puis transportés à Fos-sur-Mer où ils sont assemblés et enfin acheminés sur le chantier par convois exceptionnels au rythme de deux caissons par semaine.

Les caissons centraux sont assemblés, réglés puis soudés entre eux sur le chantier à partir de gabarits spécifiques. Les soudures sont toutes contrôlées à 100 % par ultrasons et magnétoscopie.

Figure 5  
Lancement du tablier  
Launching the deck



Les parties latérales permettant de réaliser la largeur totale du tablier sont assemblées aux caissons centraux à partir de gabarits spécifiques et d'étais internes provisoires (photo 4).

Chaque partie latérale est constituée de quatre panneaux et d'un caisson de rive (figure 6). Les panneaux dont la largeur est variable entre 3,90 m et 4,25 m et la longueur variable de 20 à 24 m sont livrés sur le chantier par convois exceptionnels. Le poids unitaire de chacun des panneaux est inférieur à 40 t.

Les opérations de lancement se terminent par le clavage des extrémités de porte-à-faux au milieu de la travée P2-P3. Toutes les grandes travées, exceptée la travée P2-P3 au-dessus du Tarn, comportent un appui provisoire à mi-travée. Pour les travées de rive, les appuis provisoires sont implantés à 36 m de chaque culée c'est-à-dire à 168 m des piles P1 et P7 respectivement.

Les appuis provisoires intermédiaires sont constitués de palées métalliques en treillis avec membranes et diagonales en tubes. Les palées ont une section carrée de 12 x 12 m.

Les pylônes P2 et P3 qui servent de pylône provisoire de haubanage pour la mise en place du tablier sont érigés jusqu'à une hauteur de 70 m au-dessus du tablier. Pré-assemblés au sol, les pylônes sont ensuite posés sur le tablier à l'aide d'une grue sur chenilles. La partie supérieure de chaque pylône ("chapeau") est installée après sa mise en place, la mise sur appuis et la réalisation du haubanage. A la fin du lancement, les pylônes P1 et P4 à P7 sont entièrement assemblés et soudés sur les plates-formes situées derrière la culée C0 pour le pylône P1 et derrière la C8 pour les pylônes P4 à P7.

Les têtes des palées provisoires ( $\pi 2$  à  $\pi 6$ ) et les têtes de piles sont équipées d'un chevrete recevant les appuis de lancement appelés balancelles et les plates-formes de travail.

Sur chaque tête de piles ou palées, chaque balancelle est munie d'un "translateur", système à deux vérins hydrauliques horizontaux de 60 t assurant soit l'effort moteur, soit l'effort de freinage pour le déplacement du tablier. Chaque translateur est constitué d'un berceau en "U" dans lequel se déplacent une cale biaise de levage actionnée par un vérin horizontal de 250 t et une coulisse actionnée par les deux vérins de lancement de 60 t et glissant d'une distance de 600 mm sur une surface horizontale.

## ■ L'ORGANISATION DU CHANTIER

L'organigramme général de l'opération est décrit dans le tableau de la figure 1.

Les travaux du viaduc sont réalisés par le groupement d'entreprises Eiffage TP - Eiffel Construction Métallique; Eiffage TP étant le mandataire du groupement représenté par son directeur du projet.

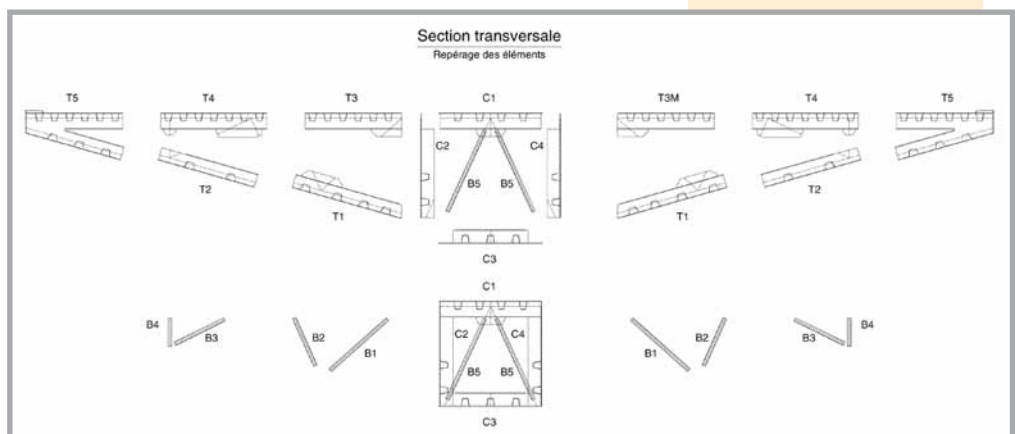
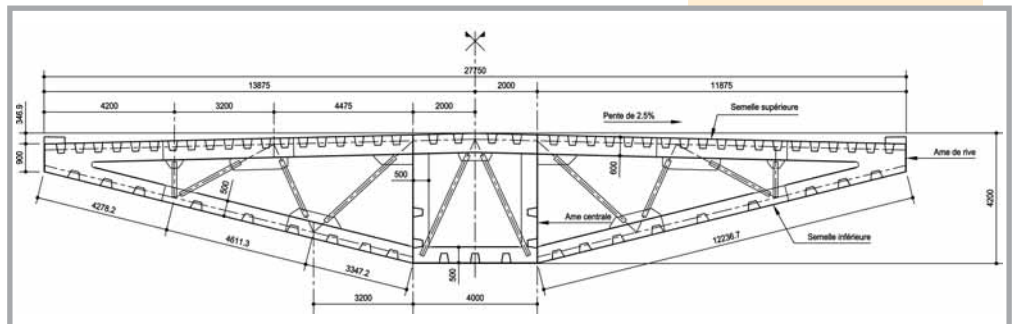


Photo 3  
Fabrication dans l'usine de Lauterbourg  
*Manufacturing in the Lauterbourg plant*



Photo 4  
Assemblage du tablier métallique sur site  
*Assembly of the steel deck on site*

Figure 6  
Découpage en tronçons de la section transversale du tablier  
*Breakdown of the cross section of the deck into sections*



L'organisation du chantier génie civil comprend :

- ◆ un directeur de travaux qui s'appuie sur trois conducteurs de travaux principaux :
  - un conducteur de travaux en charge des installations de chantier et des travaux de fondations des palées, puits et semelles,
  - un conducteur de travaux en charge des culées C0, C8 et de la pile P1,
  - un conducteur de travaux en charge des piles hautes P2 à P6 ;
- ◆ une direction technique sur site ;
- ◆ un service administratif ;
- ◆ un service gestion-ordonnancement ;
- ◆ un service matériel ;
- ◆ un service informatique ;
- ◆ une direction qualité ;
- ◆ un service sécurité.

L'organisation du chantier charpente métallique comprend :

- ◆ un directeur de projet métal ;
- ◆ un responsable de la fabrication en usine (usines de Lauterbourg, Fos-sur-Mer, Maizières et Frouard) ;
- ◆ un directeur du montage et lancement qui s'appuie sur un conducteur de travaux principal ;
- ◆ une équipe de six ingénieurs chargés de suivre la fabrication des différents sous-traitants ;
- ◆ un service qualité ;
- ◆ un service sécurité ;
- ◆ un service gestion financière ;
- ◆ un service achats et transports installé à Colombes au siège d'Eiffel.

### CONCLUSION

Quinze mois après la parution du décret de concession au Journal Officiel, la première opération de lancement du tablier aura lieu.

Les travaux se déroulent conformément au planning prévisionnel (les cycles de réalisation des levées des piles sont maîtrisés par le chantier) et une première pile vient d'être terminée dans les délais contractuels (pile P7).

A la fin de l'année 2002, plus de 50 pour 100 des bétons de l'ouvrage ont été coulés. Aussi, tous les paris les plus audacieux dont en particulier ceux en matière de délai de construction sont sur le point de se réaliser.

L'organisation choisie, les méthodes retenues, les moyens mis en œuvre, les options qui ont été prises et les choix technologiques qui ont été faits permettent, grâce à la compétence et au professionnalisme, à tous les niveaux, de l'ensemble des acteurs, de réaliser cet ouvrage exceptionnel et de grande qualité architecturale à la plus grande satisfaction de l'Etat concédant et du concessionnaire.

### ABSTRACT

#### The Millau viaduct

*J.-P. Martin, M. Buonomo, Cl. Servant*

The Millau viaduct is a structure costing 320 million euros (2.1 billion francs) financed and constructed by Eiffage Group within the framework of a concession arrangement. Its subsidiary, Compagnie Eiffage du viaduc de Millau, is concession operator of the structure for 75 years. This viaduct, 343 metres high at the top of the towers, is the last link on the A75 motorway Clermont-Ferrand/Béziers. The search for an aesthetically attractive structure led Michel Virlogeux, who had already designed the Normandy Bridge, to the principle of a multiple-cable-stayed viaduct, consisting of thin piers with slender lines and a very light deck, just touching the valley at only seven points (excluding abutments). The precision required for each phase of engineering means that numerous verifications are required, especially by GPS satellite. The viaduct crossing will be paying. A toll gate for which the canopy will be constructed of Ceracem (ultra-high-performance fibrous concrete) will be installed about 6 km to the north of the viaduct at Saint-Germain.

### RESUMEN ESPAÑOL

#### El viaducto de Millau

*J.-P. Martin, M. Buonomo y Cl. Servant*

El viaducto de Millau representa una estructura cuyo coste se eleva a 320 millones de euros (2.100 millones de francos) costado y ejecutado por el grupo Eiffage en el marco de una concesión. Su filial, la Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau, actúa como concesionaria de esta estructura durante un plazo de 75 años. Este viaducto, de una altura de 343 m en las torres de anclaje, constituye el último eslabón de la autopista A 75 Clermont-Ferrand/Beziers. La investigación destinada a lograr una estructura estética ha conducido a Michel Virlogeux, que ya había proyectado el puente de Normandía, al principio de un viaducto multiatirantado, formado por pilares de bajo espesor y líneas esbeltas y un tablero sumamente ligero, traspasando el valle en tan sólo siete puntos (salvo estribos). La precisión requerida para cada etapa técnica impone en este caso múltiples

verificaciones, y fundamentalmente mediante datos procedentes del satélite GPS. El franqueo del viaducto será de previo pago. Una barrera de peaje, cuyo cobertizo se ejecutará en material Ceracem (BFUP) se habrá de instalar a unos 6 km del norte del Viaducto en Saint Germain.

# Rocade nord de Béziers

## Le nouveau pont sur l'Orb

Le pont sur l'Orb de la Rocade nord de Béziers dans l'Hérault est un pont à trois travées de 142 m de longueur. En compétition sur deux solutions lancées en appel d'offres, une solution en structure mixte bipoutre et une solution en béton précontraint construite par encorbellements successifs, c'est la solution en béton précontraint qui a été retenue sur une variante de construction. Moyennant une translation de 6 m de chacune des deux piles vers les rives de façon à augmenter la portée de la travée centrale pour la rendre égale au double des portées de travées de rive, la méthode de construction retenue a consisté à préfabriquer l'ouvrage en deux fléaux correspondant chacun à un demi-tablier, chaque fléau étant construit sur une rive, puis à les pousser l'un vers l'autre avant de les claver au milieu de la travée centrale. Le tablier de 3,0 m de hauteur et 21,64 m de largeur est un caisson mono-cellulaire de 6,50 m entre âmes avec de larges encorbellements soutenus par des bracons parallèles.

La Rocade nord de Béziers est une vaste opération routière de 6 km de longueur, engagée par la Direction départementale de l'Équipement de l'Hérault et destinée à achever le contournement de la ville en reliant les différentes voies de circulation qui convergent vers cette grande agglomération languedocienne, notamment les RN9, RN112, RN113 ainsi que les CD11 et CD909, afin de rendre le trafic plus fluide et éviter à une bonne partie de la circulation de pénétrer à l'intérieur de la ville. Cette voie aux caractéristiques autoroutières, qui doit à terme se raccorder à l'autoroute A9 "La Languedocienne" au droit des deux échangeurs "Béziers est" et "Béziers ouest", doit franchir le fleuve "Orb" au nord-ouest de la ville, l'axe de la chaussée ayant par rapport à l'axe du fleuve un biais d'environ 40 degrés. A cet endroit, ce fleuve aux régimes de crues aussi subits que violents a une largeur de 70 m au niveau de son lit mineur, pour un champ d'inondation d'environ 600 m. Outre la construction du pont sur l'Orb, objet du présente article, et à proximité de ce dernier, le projet comporte aussi la réalisation d'un ouvrage de décharge de 50 m d'ouverture, l'ensemble des deux ouvrages étant conçus pour laisser passer la crue de référence de 2 400 m<sup>3</sup>/s.

En vue d'établir un avant-projet pour la consultation des entreprises, la DDE 34 a fait étudier en parallèle deux solutions : une première, dite "solution A", conçue par le CETE Méditerranée, comportant un tablier en ossature mixte acier/béton, de type bipoutre avec entretoises et hourdis supérieur précontraint transversalement, et une seconde, dite "solution B", conçue par le bureau d'études EEG Simecsol, comportant un tablier de

type caisson monocellulaire entièrement en béton précontraint construit par encorbellements successifs avec hourdis supérieur en dalle pleine de forte épaisseur, compte tenu de ses larges encorbellements. Dans chacune de ces deux solutions, qui avaient l'une et l'autre fait d'objet d'une étude architecturale spécifique par les architectes urbanistes P.-G. Dezeuze et F. Zirk, conseils du maître d'œuvre, l'ouvrage, d'une longueur totale de 143,50 m, comportait un tablier unique de largeur 21,64 m, formé d'une poutre continue de hauteur constante égale à 3,00 m, à trois travées symétriques de portées respectivement 41,10 m, 59,80 m et 41,10 m.

Lancé sur ces deux projets de base, l'appel d'offres autorisait les entreprises à présenter des variantes limitées portant essentiellement sur les seuls points suivants :

- ◆ pour la solution A à tablier en ossature mixte :
  - le mode de mise en place de l'ossature métallique du tablier,
  - la cinématique de construction,
  - la modification ou la suppression de la précontrainte transversale (remplacement dans ce cas des entretoises par des pièces de pont), sous réserve de ne pas écarter les lignes d'appui des poutres par rapport à l'axe longitudinal de l'ouvrage,
  - la préfabrication de certaines parties du hourdis supérieur ;
- ◆ pour la solution B à tablier entièrement en béton précontraint :
  - la modification ou la suppression de la précontrainte transversale (remplacement dans ce cas du hourdis plein par un hourdis comportant des nervures), sous réserve de ne pas écarter les lignes

*Bruno Vachin*  
CHEF DE LA DIVISION GT  
*Vincent Montel*  
CHEF DU BUREAU D'ÉTUDES  
OUVRAGES D'ART  
*Roland Richard*  
INGÉNIEUR  
DDE de l'Hérault

*Jean Vassord*  
INGÉNIEUR EN CHEF  
E.E.G. - Simecsol

*Pierre-G. Dezeuze*  
ARCHITECTE URBANISTE

*Jean-Pierre Vitu*  
DIRECTEUR D'AGENCE

*Pascal Carlos*  
DIRECTEUR DE CHANTIER  
Razel Pico Sud - Languedoc Roussillon

*Georges Palancade*  
DIRECTEUR D'AGENCE

*Patrick Gressier*  
CHEF DE CHANTIER  
Bec

*Michel Placidi*  
DIRECTEUR TECHNIQUE DU GROUPE  
RAZEL

*Jean-Luc Dufresne*  
DIRECTEUR ADJOINT

*Luc Amoros*  
CHEF DU SERVICE MÉTHODES  
Razel T. & M.



d'appui des poutres par rapport à l'axe longitudinal de l'ouvrage,

- sur l'implantation exacte des piles en autorisant une légère augmentation de la portée de la travée centrale, dans la mesure où cet élargissement ne pouvait qu'améliorer les conditions d'écoulement hydraulique du fleuve, notamment en cas de crue ;

- ◆ pour les deux solutions A et B :

- le mode de réalisation des appuis en rivière,

- la modification des longueurs des travées de l'ouvrage par déplacement des piles vers les culées, sous réserve de ne pas modifier la longueur totale de l'ouvrage, cette augmentation de la portée de la travée centrale ne pouvant qu'améliorer les conditions d'écoulement hydraulique du fleuve, notamment en cas de crue.

C'est le groupement d'entreprises Razel Pico Sud - Languedoc Roussillon (mandataire)/Bec qui a été retenu, à l'issue de l'analyse des offres présentées, et c'est sur la solution variante à tablier en béton précontraint, proposée par ce groupement, que le marché a été passé.

## ■ DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Utilisant les possibilités qui étaient offertes aux entreprises dans le cadre du règlement de la consultation, le groupement Razel Pico Sud/Bec a proposé un projet variante portant sur les deux points principaux suivants :

1. Légère augmentation de la portée de la travée centrale et réduction correspondante des portées des travées de rive, en déplaçant de 6 m environ les deux piles vers les culées d'extrémité, sans modifier l'implantation de ces dernières, c'est-à-dire sans changer la longueur totale de l'ouvrage. Cet aménagement apporte trois avantages importants :

- ◆ d'une part, il permet d'améliorer l'écoulement hydraulique de l'Orb en cas de crue, en augmentant sensiblement la largeur de passage dans la passe principale et en minimisant ainsi l'effet d'obstacle créé par les piles ;

- ◆ d'autre part, rapprochant les piles des berges, il améliore les conditions d'évolution et de travail autour des piles, en facilitant l'accès aux batardeaux et en minimisant les terrassements des plates-formes nécessaires pour les réaliser ;

- ◆ enfin, et peut-être surtout, il ramène la répartition des portées des trois travées à un rapport de type "1-2-1" (chaque travée de rive est égale à la moitié de la travée centrale) ce qui permet d'envisager une méthode de construction du tablier par préfabrication et poussage depuis les deux extrémités, avec tous les avantages que cette méthode de construction apporte tant sur le plan de la qualité de la réalisation, que de la sécurité du personnel, de la simplicité et de la rapidité d'exécution ou de l'économie du projet.

2. Aménagement du fonctionnement transversal du hourdis supérieur du caisson monocellulaire du tablier, en concevant une disposition qui permette de supporter les très larges encorbellements extérieurs de la dalle, au moyen de bracons inclinés, jouant ici le même rôle que les nervures évoquées dans le règlement de la consultation.

Cela a permis de réduire la largeur du caisson en rapprochant les âmes et donc les lignes d'appui par rapport à l'axe longitudinal de l'ouvrage, ce qui, là aussi, était envisagé dans le règlement de la consultation et allait dans le sens général d'un allègement global de la structure.

Du fait de cette réduction sensible de la largeur du caisson, le dessin des piles et du chevêtre qui les coiffe a pu être affiné, en concertation avec le maître d'œuvre et son architecte conseil en conservant l'esprit général du projet d'origine ainsi que l'aspect esthétique et architectural des piles – fût cylindrique surmonté par un chevêtre en forme d'enclume.

Ainsi aménagé, l'ouvrage de franchissement de l'Orb est donc un pont en béton précontraint de 143,50 m de longueur totale, dont 142,00 m entre axes des appuis extrêmes. Il est constitué d'un tablier unique de 21,64 m de largeur supportant une plate forme autoroutière livrant passage à deux chaussées de deux voies de circulation chacune, avec B.A.U. latérales et GBA centrale. L'ouvrage comporte trois travées de portées respectivement 35,00 m, 72,00 m et 35,00 m entre axes des appuis, le tablier étant formé d'une poutre continue de hauteur constante égale à 3,00 m. La géométrie générale de l'ouvrage est inchangée par rapport à celle du projet de base, c'est-à-dire que le profil en long est formé d'une parabole concave de "rayon" 20 000 m sur pratiquement la moitié de l'ouvrage côté rive droite, et d'une pente constante de 0,41 % sur l'autre moitié côté rive gauche, l'axe en plan est un cercle de rayon 1 300 m, et le dévers transversal de la chaussée est un dévers en toit de ± 2,5 %.

## ■ LE TABLIER

Le tablier est constitué d'une poutre continue en béton précontraint, de hauteur constante égale à 3,00 m dans l'axe de l'ouvrage. Transversalement, la section de la poutre a la forme d'un caisson monocellulaire à deux âmes verticales d'entre axes 6,50 m, avec de larges encorbellements latéraux supportés par des bracons inclinés. Ces bracons sont en apparence parallèles entre eux, mais en réalité rayonnants compte tenu de la courbure générale de l'ouvrage, et disposés au pas constant de 3,25 m compté sur l'axe (deux bracons de chaque côté par voussoir de 6,50 m). Ils sont en béton, de section rectangulaire 400 x 300 mm, et sont préfabriqués puis mis en place dans le coffrage au mo-



ment du bétonnage de la section. Compte tenu du fait que ces bracons sont entièrement comprimés, la liaison de ces bracons au béton du caisson est réalisée, en partie basse par un goujon central injecté à la résine, tandis que la liaison supérieure est réalisée au moyen d'aciers en attente noyés dans le béton du hourdis supérieur lors de son coulage.

Le hourdis supérieur est une dalle en béton, de 21,64 m de largeur, précontrainte dans les deux directions, longitudinale et transversale, d'épaisseur variable, avec des goussets variant de 20 cm en partie courante jusqu'à 54 cm au droit de leur raccordement aux âmes. La précontrainte transversale de ce hourdis supérieur est constituée de deux câbles de type 5 T 15 S à tracé sensiblement rectiligne, disposés au droit de chacun des bracons. Le rôle de ces câbles de précontrainte transversale est d'ailleurs surtout de reprendre la composante horizontale de l'effort de compression transitant dans les bracons et d'éviter ainsi de mettre en traction le hourdis supérieur sous l'effet de cette composante horizontale.

Le hourdis inférieur est lui aussi une dalle en béton continue de 20 cm d'épaisseur dans sa partie centrale qui comporte de larges goussets latéraux au droit de ses raccordements avec les âmes.

Comme indiqué précédemment, le tablier est construit par poussage, mais suivant la technique du poussage isostatique par les deux côtés, de type 1 - 2 - 1. Chaque fléau, représentant un demi-tablier, est préfabriqué sur une aire de préfabrication aménagée derrière la culée correspondante, sur une plate-forme préchargée deux ans avant la construction de l'ouvrage par 9 m de matériaux drainant et équipée de drains verticaux selon une maille carrée de 1,50 m de côté. Les tassements relevés sous ce préchargement ont été de 29 à 40 cm au bout de 6 mois.

Du fait de cette méthode de construction, la répartition des efforts de poids propre dans la structure est quasiment identique à celle d'un pont construit par encorbellements successifs, c'est-à-dire avec application de l'effort de poids propre en console sous la forme de fléaux isostatiques engendrant essentiellement des moments négatifs dans les consoles, moments maximaux au droit des appuis, légèrement atténués ensuite par une redistribution des efforts par fluage après clavage et mise en continuité des deux fléaux. Du fait de cette distribution particulière des portées des travées, le non soulèvement sur les culées, notamment sous les surcharges routières d'exploitation, est obtenu à la fois par le poids propre important du voussoir sur culée et par un contreponds en béton coulé au droit de ce voussoir sur culée, en fin de construction de l'ouvrage.

Le câblage de précontrainte longitudinale est un câblage de type mixte, c'est-à-dire comportant des câbles intérieurs et des câbles extérieurs au bé-

ton, de conception très classique pour les tabliers construits par encorbellements successifs. Il est constitué de trois familles de câbles :

◆ **famille 1** : les câbles de fléau, ou "câbles chapeau", régnant en partie supérieure de la section, symétriquement de part et d'autre des appuis et mis en tension au fur et à mesure de la construction de chaque paire de voussoirs : il s'agit de câbles de type 19 T 15 S et 18 T 15 S, à tracés sensiblement droits, placés à l'intérieur du béton, disposés au droit des goussets supérieurs de jonction des âmes et du hourdis supérieur pour les 19 T 15 S, et au droit des nervures longitudinales joignant les têtes des bracons pour les 18 T 15 S. Ces câbles sortent dans les tranches des voussoirs. Nous avons six paires de câbles 19 T 15 S et six paires de câbles 18 T 15 S ;

◆ **famille 2** : les câbles de solidarisation : ils sont placés en partie basse de la section, régnant dans la partie centrale de la travée centrale et sont mis en tension aussitôt après le clavage des deux fléaux : il s'agit de câbles 19 T 15 S, à tracés sensiblement droits, placés à l'intérieur du béton, disposés dans les goussets de jonction des âmes et du hourdis inférieur. Ces câbles sortent dans des bossages. Nous avons trois paires de câbles 19 T 15 S ;

◆ **famille 3** : les câbles de continuité : ce sont des câbles continus régnant soit sur la travée centrale (une paire de câbles 19 T 15 S), soit sur deux travées, une travée de rive et la travée centrale, en se recouvrant d'ailleurs dans la travée centrale de façon à exercer un effet double dans cette travée plus fortement sollicitée (deux paires de câbles 19 T 15 S). Ils sont extérieurs au béton, ancrés dans les entretoises sur piles ou sur culées et déviés dans des déviateurs intermédiaires.

La répartition des câbles intérieurs de la première famille en quatre zones réparties sur toute la largeur du hourdis supérieur, au droit des âmes et en haut des bracons permet d'avoir une bien meilleure répartition et diffusion des effets de la précontrainte et éviter les risques de distribution non uniforme des contraintes normales, que l'on peut toujours craindre dans le cas de section de grande largeur. Les câbles intérieurs au béton des première et deuxième familles sont disposés dans des gaines en feuillard métallique et injectés au coulis de ciment, tandis que les câbles extérieurs de la troisième famille sont placés dans des gaines en PEHD et injectés à la cire pétrolière.

## ■ LES PILES

Chacune des deux piles, située en bordure de l'Orb, est constituée d'un fût cylindrique unique en béton armé, surmonté d'un chevêtre, lui aussi en béton armé et supportant les appuis du tablier. Ces deux piles sont fondées sur des pieux forés.

Chaque pile est réalisée à l'intérieur d'un batar-



**Photos 1 et 2**  
 Recépage des pieux par la méthode "Recépieu"<sup>®</sup> : extraction à la pelle de la partie supérieure polluée après prédecoupage à l'éclateur chimique

*Cutting off piles by the "Recépieu"<sup>®</sup> method : extraction by shovel of the polluted upper section after preliminary cutting out by chemical burster*

**Photo 3**  
 Coffrage de la pile P2 sur la plate-forme remblayée en rive gauche protégée contre les crues par des enrochements

*Shuttering of pier P2 on the backfilled platform on the left bank protected against flooding by riprap*



► deau carré en palplanches métalliques de type PU16, battues depuis la berge et au fond duquel est coulé, après excavation, un bouchon de béton immergé de 2,00 m d'épaisseur assurant l'étanchéité de l'enceinte lors de sa vidange et reprenant les sous-pressions.

Chaque pile est fondée de façon profonde sur quatre pieux forés de 1 600 mm de diamètre, de longueur respectivement 12,00 m pour la pile P2 et 14,00 m pour la pile P4, ancrés en pieds dans le substratum résistant.

Les quatre pieux de chaque pile s'encastrent en tête dans une semelle en béton armé de forme carrée de 7,60 m de côté et de 2,00 m d'épaisseur. Le recépage des pieux est réalisé suivant la méthode "Recépieu"<sup>®</sup>, de prédecoupage à l'éclateur chimique et d'extraction de la partie supérieure du pieu (photos 1 et 2).

Le fût de chaque pile est un cylindre vertical de 4,00 m de diamètre, plein, en béton armé, ayant une hauteur de 10,32 m pour la pile P2 et 8,17 m pour la pile P3 (photo 3).

Le chevêtre supérieur est du type "chevêtre mar-

teau", de section trapézoïdale en forme d'enclume inversée, venant coiffer le fût cylindrique. D'épaisseur 3,00 m, sa face supérieure est un rectangle de 8,00 m par 4,00 m, pour lui permettre de recevoir les appareils d'appui définitifs du tablier ainsi que les emplacements de vérins pour l'éventuel remplacement de ces appareils d'appui, et, en phase provisoire, les appuis glissants de poussage du tablier en construction.

Les appareils d'appui définitifs du tablier sont constitués de blocs de néoprène fretté rectangulaires de deux fois 800 x 800 mm en plan de chaque côté, c'est-à-dire quatre appuis par tête de pile, comportant chacun six feuillets de 15 + 4 mm.

## ■ LES CULÉES

Les deux culées, C1 sur la rive gauche, et C4 sur la rive droite de l'Orb, sont quasiment identiques aux culées du projet de base, à la seule différence de leur adaptation aux efforts appliqués par le tablier, qui sont sensiblement plus réduits que ceux appliqués dans la base. Cette diminution des efforts verticaux appliqués par le tablier provient d'une part de l'allègement proprement dit du tablier dans sa section transversale, mais aussi et surtout de la diminution des portées des travées de rive qui se traduit par une réduction des réactions d'appui de poids propre, de superstructures et de surcharges d'exploitation.

Ainsi chaque culée est fondée sur cinq pieux forés chemisés de diamètre 1 400 mm, de 16,80 m de longueur sur la culée C1 et de 19,50 m de longueur sur la culée C4. Sur ces cinq pieux par culée, deux sont placés sur la file avant, sensiblement au droit des appareils d'appui du tablier et trois sont placés sur une file arrière, décalée de 1,10 m par rapport à la file avant.

La culée proprement dite est constituée d'un chevêtre parallélépipédique de 3,50 m de largeur, de 21,64 m de longueur et 1,80 m d'épaisseur en sa partie centrale, en béton armé. Il comporte un mur garde-grève arrière, retenant le remblai sous chaussée et des murs latéraux cachant le vide autour du tablier.

Des dés d'appuis coulés sur le chevêtre reçoivent les appareils d'appui du tablier ainsi que les éventuels vérins pour relever ce dernier. Ces appareils d'appui sont constitués de blocs de néoprène fretté rectangulaires de 600 x 600 mm en plan, comportant six feuillets de 12 + 3 mm.

Les murs caches ceinturant la culée, qui sont constitués de voiles en béton armé préfabriqués ont reçu un traitement architectural spécifique. Les culées sont en outre insérées dans un ensemble de talus végétalisés et de gabions assurant d'une part la protection de ces talus vis-à-vis d'éventuels risques de crues de l'Orb et d'autre part l'insertion de l'ouvrage dans le site.

## ■ LA MÉTHODE DE CONSTRUCTION DU TABLIER

Comme indiqué précédemment, la méthode de construction du tablier de l'ouvrage consiste à préfabriquer chaque fléau représentant la moitié du tablier sur une rive, en dehors de l'emprise proprement dite de la brèche, en arrière de la culée concernée, puis à le translater à son emplacement définitif par un poussage longitudinal. C'est la technique du poussage par les deux côtés, appliqué aux ouvrages de type "1 - 2 - 1". Mais cette technique de poussage comporte un certain nombre de spécificités qui la différencient sensiblement de la technique classique de construction des grands ouvrages mis en place par poussage d'un seul côté. Ces spécificités portent essentiellement sur la conception particulière des aires de préfabrication, et leur corollaire les coffrages de coulage du tablier, sur l'absence d'avant-bec ou de tout autre dispositif de reprise des efforts en console ou avant accostage, ainsi que sur le schéma statique de la structure durant le poussage et donc sur la conception du câblage de précontrainte.

### Les aires de préfabrication

La principale particularité de ces aires de préfabrication, compte tenu de la méthode de réalisation du tablier, est leur grande simplicité, ainsi que la simplicité des coffrages pour réaliser les différents voussoirs. Ces aires de préfabrication, pour réaliser chaque fléau, sont situées en arrière de chaque culée concernée. Elles sont constituées d'une simple plate-forme d'un peu plus de 75 m de longueur environ, correspondant à la longueur du fléau préfabriqué, arasée sur le remblai, dans le prolongement géométrique du profil en long de l'ouvrage.

Chaque aire de préfabrication comporte, en son centre, un appui provisoire, constitué d'une semelle enterrée fondée sur deux pieux, sur lequel va s'appuyer le fléau au fur et à mesure de sa construction. Cet appui provisoire doit être capable de supporter le poids propre du fléau complet. L'aire de préfabrication comporte en outre quatre longrines longitudinales sur lesquelles s'appuient les coffrages des voussoirs, fonds de moule pour le hourdis inférieur et tables coffrantes pour le hourdis supérieur. Par contre, ces longrines ne servent ni d'appui au tablier (tout au plus de stabilisateur provisoire), ni de support glissant lors du poussage (photo 4).

Les coffrages de réalisation des voussoirs sont formés d'un fond de moule simplement appuyé au sol tout proche pour la réalisation du hourdis inférieur, de banches verticales pour le coulage des âmes et de tables coffrantes pour le hourdis supérieur. Compte tenu des cycles de construction retenus et du faible nombre de réemplois, ces coffrages ne sont que très peu mécanisés (photo 5).



**Photo 4**  
Vue d'ensemble du coffrage du voussoir sur pile au démarrage de la construction du fléau. Au premier plan, les longrines d'appui des coffrages

*General view of shuttering of the segment on the pier when starting construction of the deck section. In the foreground, the shuttering support stringers*



**Photo 5**  
Premier voussoir sur pile décoffré

*First segment on pier with shuttering removed*



**Photo 6**  
Détail du coffrage des encorbellements latéraux au moyen de tables coffrantes

*Detail of shuttering of side cantilevers by means of casting tables*

Chaque voussoir courant est coulé en deux phases : une première phase comprenant le hourdis inférieur et les deux âmes, puis, après la pose des deux paires de bracons préalablement préfabriqués, une seconde phase concernant le hourdis supérieur (photo 6).

Un seul jeu de coffrage est mis en œuvre qui va alternativement permettre sur le même fléau le coulage d'un voussoir côté travée de rive puis de son voussoir symétrique côté travée centrale, la mise en tension des câbles de fléau correspondant et le décoffrage de ces voussoirs ne s'effectuant qu'après coulage des deux voussoirs formant la paire. Dans le cas présent du pont sur l'Orb, la lon-

► gueur de chaque voussoir, y compris les V.S.P., était de 6,50 m et chaque fléau comportait, outre le VSP, cinq paires de voussoirs, soit onze voussoirs au total par fléau (photo 7).  
Le béton prévu pour l'ensemble du tablier était du B45. Fabriqué dans une centrale de BPE située à proximité du chantier, les bétons effectivement mis en œuvre ont pendant toute la durée du chantier présenter des résistances sensiblement supérieures aux résistances requises.

le tablier, sont accrochées, à l'arrière, à deux sabots, appelés "peignes", traversant le tablier dans des trous provisoires disposés tous les 6,50 m. A l'avant, ces barres de traction, sont accrochées par paire à un chevêtre fixé à la tête de chacun des deux vérins. Ce dispositif permet un poussage, en semi-continu, par "bonds" successifs de 70 cm environ, correspondant à la course des vérins (photo 8).

Le glissement du tablier ne s'effectue normalement que sur l'appui provisoire, au milieu de l'aire de préfabrication, sur la culée et sur la pile. Sur chacun de ces appuis, la réaction d'appui varie de zéro à la charge totale du fléau, c'est-à-dire 2 400 t, sur la file d'appui complète au moment où le voussoir sur pile passe sur l'appui concerné. Les dispositifs de glissement sont donc des dispositifs de glissement classiques utilisés pour la mise en place de la plupart des grands ponts poussés, c'est-à-dire des dispositifs constitués de selles en acier inoxydable poli sur lesquelles glissent des plaques de glissement en néoprène Téflon® introduites manuellement. Ces selles comportent des emboutages avant et arrière en forme de spatule destinés à faciliter l'introduction et la sortie des plaques de glissement.

Tout au long de son déplacement, le tablier est guidé en deux points de chaque côté, au début sur l'appui provisoire au milieu de l'aire de préfabrication et sur la culée, puis, dès qu'il a accosté sur la pile, il est guidé sur la culée et sur la pile jusqu'à son arrivée dans sa position finale. Compte tenu de la géométrie de l'ouvrage, les efforts de guidage demeurent extrêmement faibles (photo 9).

## Précontrainte de l'ouvrage lors du poussage

Compte tenu de la répartition des efforts de poids propre essentiellement en console au départ du poussage puis de leur répartition isostatique lors du poussage toujours sur deux appuis, le fléau n'est en permanence soumis qu'à des moments négatifs, tout au plus nuls en son centre lors de sa position médiane, avec la même console au-delà de la pile et en arrière de la culée, cette position se retrouvant deux fois pour chaque fléau. Dans ces conditions, les calculs le montrent, il n'est pas nécessaire de rajouter une quelconque précontrainte provisoire qui serait nécessaire durant les phases de poussage. La précontrainte de fléau, constituant la première famille du câblage défini précédemment est suffisante pour assurer la résistance et l'intégrité du béton durant le poussage.

## Mise sur appuis définitifs de l'ouvrage

Après que chaque fléau ait été amené dans sa position finale, et que l'on ait procédé au réglage

**Photo 7**  
Réalisation du dernier voussoir du fléau, le voussoir sur culée, encore appuyé sur son fonds de moule  
*Construction of the last segment of the deck section, the segment on abutment, still supported by its mould bottom*



**Photo 8**  
La paire de vérins hydrauliques permettant d'assurer le poussage du tablier par traction sur les barres  
*The pair of hydraulic cylinders making it possible to perform deck pushing by drawing on the bars*



## Dispositifs de poussage, de glissement et de guidage

Le poussage de chaque fléau est réalisé au moyen de quatre barres de précontrainte de type DY36, pouvant développer un effort unitaire de 80 t et de deux vérins hydrauliques de force utile 250 t chacun. En réalité, les efforts nécessaires étaient sensiblement plus faibles, la disposition retenue l'ayant été surtout pour des raisons de maîtrise de la répartition des efforts de traction et de symétrie des charges sur les vérins. Ces barres, passant sous

de nivellement de façon à les placer rigoureusement suivant le niveau requis, (ligne rouge, déduction faite des déformations ultérieures et différées), on effectue le clavage central par bétonnage en place du voussoir de clavage d'une longueur de 0,50 m. L'opération suivante, aussitôt après le clavage consiste à mettre en œuvre la précontrainte de solidarisation puis la précontrainte de continuité (seconde et troisième familles de câbles). On procède enfin à la mise sur appuis définitifs du tablier, de façon classique, par vérinage au droit des appuis sur piles et sur culées, procédant, à cette occasion, à un dernier contrôle des réactions d'appui pour s'assurer de la bonne répartition des charges dans la structure.

## ■ DÉROULEMENT DU CHANTIER

Les études d'exécution ainsi que les méthodes ont été réalisées par Razel T. & M., direction technique du groupe Razel. Ces études ont été contrôlées pour le compte du maître d'œuvre par le bureau d'études E.E.G. - Simecsol de Lyon. Les armatures passives ont été réalisées et mises en œuvre par Cepaba. La précontrainte a été réalisée et mise en œuvre par VSL.

Le chantier a démarré en octobre 2001 avec les installations générales, les premiers terrassements, la préparation des plates-formes pour les piles et pour les aires de préfabrication du tablier derrière les culées. Il s'est ensuite poursuivi avec la réalisation des batardeaux de palplanches, des pieux de fondations et des appuis, piles et culées (semelles, fûts et chevêtres), ainsi que les pieux et chevêtres des appuis provisoires au milieu des deux aires de préfabrication (photo 10).

Le fléau P2 en rive gauche a été préfabriqué entre les mois de février et de mai 2002 (photo 11).

Après transfert des différents matériels de coffrage sur l'autre rive, le fléau P3 en rive droite était préfabriqué entre les mois de juillet et d'octobre 2002 (photo 12).

Le poussage du premier fléau P2 s'est effectué en quatre jours pour se terminer le 25 octobre et celui du fléau P3 en trois jours pour se terminer le 15 novembre.

En réalité, l'apparition de quelques microfissures en partie supérieure de la section au droit des premiers voussoirs près de la pile P2, a conduit le groupement à modifier légèrement la procédure de poussage initialement prévue.

En effet, cette procédure initiale prévoyait la mise en place d'un contre-poids de 55 t en extrémité avant du fléau, côté travée centrale, destiné à équilibrer parfaitement l'ensemble en compensant le déséquilibre du voussoir sur culée plus lourd que son homologue en travée centrale, mettant ainsi le tablier en appui sur la culée dès le démarrage, ce qui permettait de pousser en isostatique un fléau



**Photo 9**  
Introduction d'une plaque de glissement en néoprène Teflon® sur la platine de glissement en acier inoxydable au droit de l'appui sur culée. A droite du dé le dispositif de guidage latéral du tablier

*Insertion of a slide plate of Teflon® neoprene on the stainless steel slide plate at the level of the support on abutment. To the right of the supporting block, the deck lateral guiding system*



**Photo 10**  
Vue d'ensemble du chantier : réalisation des plates-formes de travail pour l'exécution des appuis, des batardeaux de palplanches et des pieux de fondation des piles. En arrière plan, préparation de l'aire de préfabrication du tablier

*General view of the site : construction of the work platforms for execution of supports, sheet piling cofferdams and pier foundation piles. In the background, preparation of the deck prefabrication area*



**Photo 11**  
Vue aérienne de l'ensemble du chantier rive gauche : la pile P2, la culée C1 et le fléau P2 sur son aire de préfabrication pratiquement terminé en attente de poussage

*Aerial view of the entire project on the left bank : pier P2, abutment C1 and deck section P2 on its prefabrication area practically completed, pending pushing*



**Photo 12**  
L'extrémité arrière du tablier, au droit du voussoir sur culée, en appui sur son calage provisoire, en attente du poussage

*The rear end of the deck, at the level of the segment on abutment, supported on its temporary bracing, pending pushing*

Photo 13  
"Troisième appui de poussage" rajouté de façon provisoire à l'extrémité arrière sur une distance de 4,35 m

*"Third pushing support" added temporarily at the rear end over a distance of 4.35 m*



Photo 14  
Poussage du fléau rive gauche : le tablier "sort" de la culée en abordant la travée de rive

*Pushing the left-bank deck section : the deck "comes out" of the abutment, approaching the end span*



▶ parfaitement équilibré. Du fait de l'apparition de ces microfissures, la décision a été prise de ne pas mettre de contre-poids en extrémité de la console pour ne pas risquer de les aggraver en augmentant la sollicitation de moment négatif sur appui. Pour compenser alors ce déséquilibre dû au voussoir sur culée, un troisième appui glissant a été disposé à l'extrémité arrière, au droit du voussoir sur culée. Cet appui, très faiblement chargé, n'a été maintenu que sur une distance de 4,35 m, c'est-à-dire la distance au-delà de laquelle, le fléau se retrouvait naturellement en équilibre. La très faible charge prise par cet appui (une centaine de tonnes par rapport au fléau qui pesait 2 400 t) permettait de considérer que sa présence – bien que modifiant le schéma statique de la structure –, ne perturbait pas fondamentalement la répartition des efforts sur les deux autres appuis ni les moments de flexion dans le tablier. Cet appui glissant était constitué de rouleurs "express", placés sur des carteraux (photo 13).

Dans la mesure où la configuration générale de l'ouvrage n'était pas prévue pour cela, ce poussage sur trois appuis, sur une très courte distance, a été effectué sous "haute surveillance", c'est-à-dire en contrôlant de façon quasi permanente les efforts (vérins de pesage au droit des rouleurs express à l'arrière) et les déformations (comparateurs contrôlant les flèches relatives et les imperfections géométriques). Moyennant cet aménagement de détail, les opérations de poussage se sont remarquablement bien passées (photos 14 et 15).

Le clavage central a été réalisé durant les derniers jours de novembre avec mise en œuvre de la précontrainte des seconde et troisième familles (câbles de solidarisation et de continuité). Après les finitions et les équipements de l'ouvrage, la fin des travaux est prévue pour le début de l'année 2003.

## ■ CONCLUSIONS : AVANTAGES DE CETTE MÉTHODE DE CONSTRUCTION

En conclusion et à l'issue de cette opération, nous pouvons dire que, dans le cas d'ouvrages à trois travées symétriques, lorsque, bien sûr, les répartitions des portées le permettent, cette méthode de construction par préfabrication des deux fléaux à terre puis poussage depuis les deux côtés, bien qu'elle ne soit que très rarement utilisée, présente un grand nombre d'avantages. En simplifiant un peu, on peut dire que l'on cumule les avantages du poussage et de l'encorbellement sans avoir les inconvénients de l'une et l'autre de ces méthodes. Parmi ces principaux avantages figure bien sûr la sécurité du personnel du chantier, qui travaille en permanence dans des conditions optimales d'accès et de mouvement, pratiquement au niveau du sol, ou du moins pas en haut d'un échafaudage élevé. Cet avantage sécuritaire pour le personnel peut en outre être amplifié par le fait que le personnel du chantier se trouvera, lors de l'exécution des deux demi-fléaux complètement en dehors de l'emprise de l'Orb et donc éloigné de tout danger pouvant provenir de sa présence. En corollaire à l'aspect sécuritaire, ces bonnes conditions de travail pour le personnel du chantier mais aussi pour celui du contrôle sont un gage d'assurance d'une qualité optimale du résultat final.

Outre la sécurité et la qualité, cette méthode facilite aussi le maintien d'une grande propreté sur le chantier, gage de la certification ISO 14001 de l'entreprise. Le fait de reporter les zones de travail sur les plates-formes arrières loin du lit de l'Orb permettait en effet de garantir un bien meilleur respect de l'environnement en évitant tout risque de migration d'agents polluants dans le fleuve, point d'autant plus important que le chantier se trouvait à proximité d'une zone de captage.

L'absence d'étaie, de support de coffrage ou de charpente quelle qu'elle soit dans le lit de l'Orb pendant toute la durée d'exécution du tablier permet en outre de s'affranchir totalement de tout risque et de tout aléa vis-à-vis de phénomènes accidentels liés aux crues ou aux affouillements intempestifs qui peuvent s'ensuivre.

La préfabrication du tablier à poste fixe, qui permet de garantir les meilleures conditions possibles de travail et d'accès pour le personnel du chantier mais aussi pour celui du contrôle est un gage d'assurance d'une qualité optimale du résultat final.

L'utilisation, suivant cette technique, d'un matériel spécifique simple, facile à transporter et à déplacer, dont la grande simplicité d'utilisation garantit une parfaite maîtrise d'emploi par le personnel et l'encadrement, et en outre une grande fiabilité de fonctionnement tout au long du chantier, constitue un gage supplémentaire de limitation des aléas et des risques et permet de mieux assurer le respect des délais.

Le principe même du poussage par les deux côtés, du fait de l'isostaticité permanente du schéma statique de la structure pendant les phases de poussage, supprime tout risque d'aléa géométrique qui pourrait se produire en cas de tolérances non respectées sur la géométrie de l'ouvrage et garantit une parfaite répartition des efforts de poussage et de reports de charge sur les appuis pendant toute la durée des opérations de poussage.

De par le principe même de construction de ces fléaux, certes en encorbellement, mais en pratique appuyés sur le sol, il n'y a pas à mettre en œuvre de dispositifs plus ou moins complexes d'encastrement et de stabilisation de ces fléaux sur les piles, comme dans le cas de la construction par encorbellement classique, de même qu'il n'y a pas à prendre en compte au niveau des calculs de stabilité les risques de chute accidentelle d'équipage mobile ou de chute de voussoir. De même, il n'y a pas de surconsommation de précontrainte provisoire comme dans le cas de poussage classique par un seul côté.

Le fait que le coffrage du tablier roule au sol et n'est pas en console comme dans le cas d'un équipage mobile classique d'un pont en encorbellement, permet de coffrer et de couler des voussoirs sensiblement plus longs que suivant la méthode classique, dans le cas présent 6,50 m au lieu des 3,25 m courants. Ceci permet donc de réduire de moitié le nombre de joints de voussoirs, ce qui représente deux avantages non négligeables :

◆ d'une part, au niveau du ferrailage passif du tablier : la multiplication des joints de voussoirs augmente sensiblement le ratio d'armatures étant donné que dans un cas on a recouvrement de tous les aciers filants tous les 3,25 m, dans l'autre cas, on n'a recouvrement de ces aciers que tous les 6,50 m, ce qui permet donc de diviser par deux la quantité de ces recouvrements d'armatures filantes ;



**Photo 15**  
Fin du poussage du fléau rive gauche qui arrive dans sa position définitive

*End of pushing the left-bank deck section, which reaches its final position*



**Photo 16**  
Au cours du second poussage, le fléau rive droite est parti pour rejoindre le fléau rive gauche déjà en place

*With the second pushing operation, the right-bank deck section leaves to join the left-bank deck section already in place*

◆ d'autre part, sachant que ces joints de voussoirs sont toujours des points délicats qui nécessitent une attention particulière au niveau du traitement de la reprise, et qui donc peut constituer un point fragile de la structure, diviser par deux ce nombre de points de fragilité ne peut qu'améliorer sensiblement la fiabilité et la garantie de qualité de la structure.

En outre, cette méthode de construction offre, de par les caractéristiques mêmes des dispositions technologiques retenues, une très grande fiabilité, du fait de sa simplicité, et une garantie de qualité, compte tenu des conditions optimales dans lesquelles l'ouvrage pourra être exécuté.

Enfin, outre l'intérêt économique lié au coût du matériel et aux rendements optimisés de la main d'œuvre travaillant dans ces bonnes conditions, cette méthode de construction permet d'obtenir une grande rapidité d'exécution, en permettant notamment de réaliser simultanément des tâches qui en encorbellement classique sont sur le chemin cri-

► tique du chantier. On peut ainsi, entre autres, commencer la construction d'un fléau sur son aire de préfabrication en arrière de la culée alors que l'on est en train de construire la pile sur laquelle il reposera en fin de poussage. Cette grande rapidité d'exécution permet de réduire les délais, et surtout de garantir avec le maximum de fiabilité le respect de ces délais.

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### *Maître d'ouvrage*

Etat - Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer

#### *Maître d'œuvre*

DDE de l'Hérault

#### *Assistant du maître d'œuvre*

E.E.G. Simecsol (contrôle des études)

#### *Architecte urbaniste conseil du maître d'œuvre*

Cabinet P.G. Dezeuze et F. Zirk

#### *Groupement d'entreprises*

Razel Pico Sud - Languedoc Roussillon (mandataire) - Bec

#### *Bureau d'études de l'entreprise*

Razel T. & M.

#### *Aciers passifs*

Cepaba

#### *Précontrainte*

VSL

### ABSTRACT

Béziers northern ring road.  
The new bridge over the Orb

*Various authors*

The bridge over the Orb on the Béziers northern ring road in the Hérault region is a three-span bridge 142 metres long. Following competitive bidding for two solutions for which tenders were invited, a solution with a two-beam composite structure and a prestressed concrete solution built by successive cantilevers, it was the prestressed concrete solution that was selected, with a construction variant. By translating each of the two piers by 6 metres toward the banks so as to increase the length of the centre span to make it equal to twice the length of the end spans, the construction method adopted was to prefabricate the structure in two sections each corresponding to a half-deck, each section being built on a bank, and then pushing them toward one another before keying them in the centre of the centre span. The deck, 3.0 m high and 21.64 m wide, is a single-cell box girder measuring 6.50 m between cells, with broad cantilevers supported by parallel brackets.

### RESUMEN ESPAÑOL

Circunvalación norte de Beziars. El nuevo puente sobre el Orb

*Autores diversos*

El puente sobre el Orb de la circunvalación norte de Beziars, en el departamento del Herault, es un puente de tres tramos de 142 m de longitud. En competición con dos soluciones expuestas en la licitación, una de ellas de estructura mixta de doble viga y otra solución de hormigón pretensado construida por vanos sucesivos. Esta última – o sea, la solución hormigón pretensado – corresponde a la solución adoptada. Mediante una translación de 6 m de cada uno de los pilares hacia las márgenes, con objeto de aumentar la luz entre apoyos del tramo central, para ser equivalente del doble de las luces de los tramos extremos, el método de construcción adoptado ha consistido en prefabricar las obras en dos brazos en voladizo correspondientes cada uno, a un semitablero, construyendo cada

voladizo en una orilla, y acto seguido proceder a su empuje uno sobre otro antes de su enclavamiento en medio del tramo central. El tablero, de una altura de 3 m y 21,64 m de anchura, forma un cajón monocelular de 6,50 m entre almas con amplios voladizos que toman apoyo en jabalcones paralelos.





# Concours de conception-réalisation pour le viaduc de Jaulny

## LGV Est européenne

Le viaduc de Jaulny est situé sur la ligne à grande vitesse du TGV est européen (de Vaires à Baudrecourt) dans le département de Meurthe-et-Moselle, sur les communes de Thiaucourt et Jaulny, et franchit la vallée du Rupt de Mad.

Les travaux comprennent, à l'ouest, les déblais et remblais d'accès au viaduc sur une longueur de 200 m environ, à l'est, les déblais et remblais d'accès au viaduc sur une longueur de 1300 m environ.

Le viaduc en bi-caisson mixte acier-béton a une longueur de 479 m environ et passe à 50 m au-dessus du Rupt de Mad et de la ligne ferroviaire Paris-Metz. Cet ouvrage comprend sept travées et présente un profil en travers à deux voies de circulation.

Réseau Ferré de France a choisi une formule nouvelle et innovante pour l'attribution de la conception de la maîtrise d'œuvre et des travaux : le concours conception-réalisation, qui donne au maître d'ouvrage de meilleures garanties d'achèvement et à l'entreprise une meilleure adéquation entre la conception et la réalisation.

Le viaduc de Jaulny et les terrassements adjacents constituent le tronçon J de la ligne à grande vitesse Est européenne; le tronçon J fait lui-même parti du tronçon E; il est encadré par les lots de TOARC n° 32 et 33, sous maîtrise d'œuvre Scetauroute (figure 1).

L'ouvrage proprement dit constituera pour la ligne un ouvrage d'art exceptionnel tant dans sa conception que dans sa ligne; long de 480 m il permettra

à la LGV Est européenne de franchir la vallée du Rupt de Mad, en Meurthe-et-Moselle.

### ■ LA DÉMARCHÉ DU MAÎTRE D'OUVRAGE RFF

Pour ce projet, Réseau Ferré de France (RFF) a choisi de passer un marché de conception-réalisation,

Figure 1  
Situation du viaduc dans la LGV Est européenne

▶ Viaduct location on the East European High-Speed Train Line

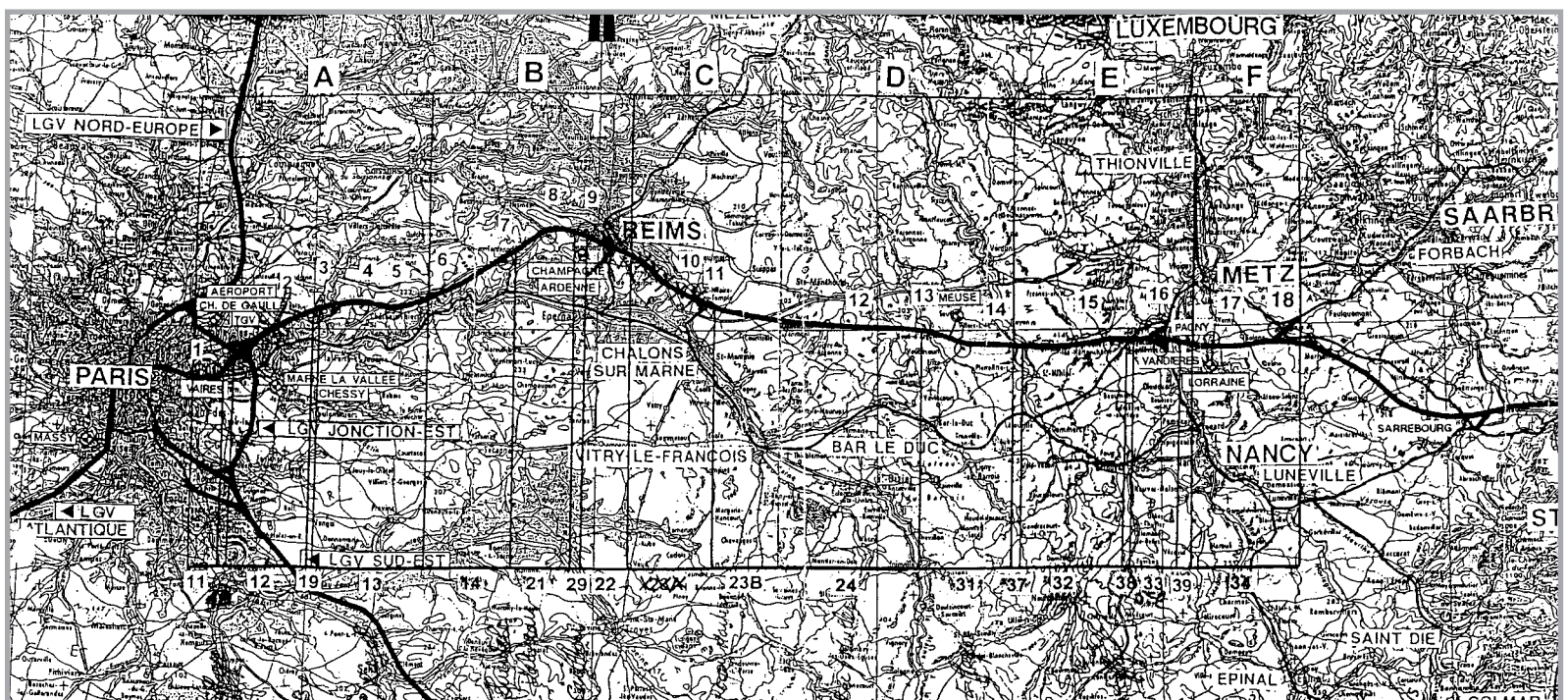


Figure 2  
Photo  
de la maquette  
*Photo  
of the mock-up*



Figure 3  
Élévation  
architecturale  
*Architectural  
elevation*



Figure 4  
Coupe  
transversale  
*Cross section*

▶ après un concours lancé en juin 2000 auprès de six groupements pluridisciplinaires (entreprises, bureaux d'études, architecte, paysagiste). Dans le cadre d'un règlement de concours très précis, les groupements ont pu se former en ayant la connaissance claire des critères de choix et de performance. Dès la conception de l'ouvrage, les différents intervenants de chaque groupement ont pu s'exprimer et apporter leurs compétences pour réaliser au mieux les engagements pris par l'Etat, au travers de la déclaration d'utilité publique, et notamment de préserver le site du chantier situé en plein cœur du parc naturel régional de Lorraine. Les différentes étapes éliminatoires des candidats ont été orchestrées par un jury spécialisé, présidé par le Directeur des opérations d'investissements de RFF – Jacques André Schneck – et composé de représentants des collectivités locales (communes

de Jaulny et Thiaucourt-Regnieville), du parc naturel régional de Lorraine et d'experts, notamment en matière ferroviaire.

Les choix du jury se sont portés sur deux candidats après la remise de l'avant-projet détaillé remis par les six candidats initiaux; à l'issue de la phase Projet, le choix du jury s'est porté sur le groupement dirigé par Eiffage TP (mandataire), en décembre 2001.

Le jury s'est prononcé à chaque étape sur la base de critères multiples :

- ◆ valeur technique de l'offre;
- ◆ montant;
- ◆ partage des aléas et des risques avec le maître d'ouvrage;
- ◆ prise en compte des contraintes environnementales;
- ◆ insertion paysagère de l'ouvrage.

Le projet retenu est décrit par les figures 2 et 3. Le coût global de la réalisation du tronçon J a été fixé à 20,7 millions d'euros.

## ■ LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

L'ouvrage franchit la voie ferrée de Lerouville à Metz, le Rupt de Mad et une ligne électrique EDF de 20 kV. Le Rupt de Mad est un cours d'eau très diversifié qui présente un intérêt écologique, piscicole et touristique; il contribue à 60 % à l'alimentation en eau potable de la ville de Metz.

La vallée du Rupt de Mad est inondable avec une fréquence élevée.

Aucune pile n'est positionnée dans le lit mineur. La zone de l'ouvrage fait partie d'un ensemble patrimonial exceptionnel : pelouse mésophile calcaire, fourrés à prunelliers, baies arbustives, passages grande et petite faune.

Le site est inscrit à l'inventaire ZNIEFF.

Le cahier des charges du marché de conception-réalisation prend en compte de façon très détaillée toutes les contraintes environnementales liées au site très protégé du projet :

- ◆ loi sur l'eau;
- ◆ biodiversité du site;
- ◆ conditions hydrauliques;
- ◆ conditions paysagères.

Ces contraintes doivent être respectées au niveau de la conception pendant la réalisation et lors de la remise en état finale (aménagement paysager important).

## ■ LA CONCEPTION DU PROJET

Dans le cadre d'un règlement de concours très précis, le groupement a pu se former en ayant la connaissance claire des critères de choix et de performance. Eiffage TP, mandataire, s'est donc entouré :

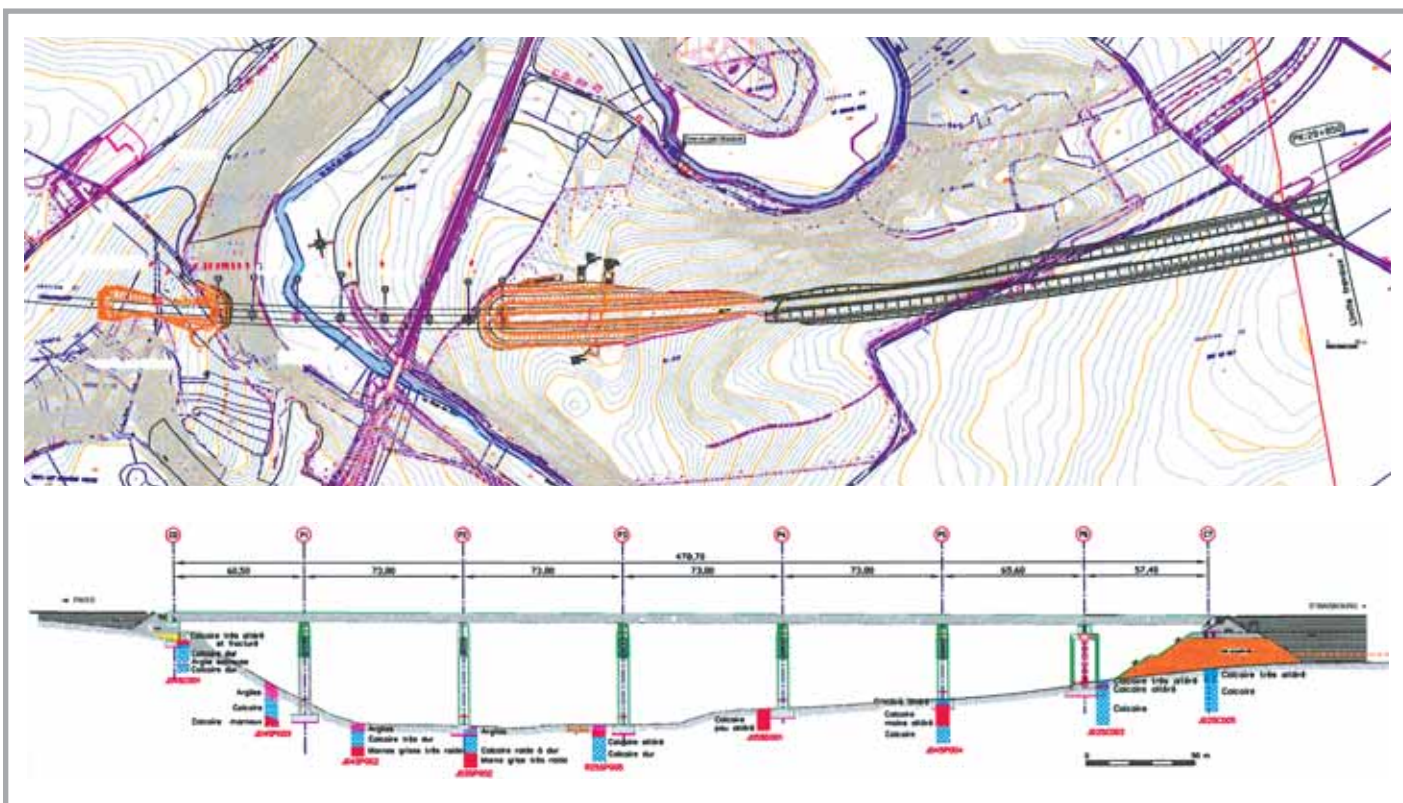


Figure 5  
 Vue en plan et profil  
 en long du projet  
 Plan view  
 and longitudinal profile  
 of the project

◆ d'un charpentier métallique Victor Buyck Steel Construction, une solution mixte étant pressentie compte tenu de la longueur de l'ouvrage et des portées probables, ainsi que du délai très court d'exécution (21 mois);

◆ d'une société d'ingénierie, Setec TPI, chargée de la conception, du dimensionnement et de la rédaction des pièces techniques et qui travaille avec Eiffage TP actuellement notamment sur le viaduc de Millau;

◆ de deux cabinets d'architectes : Neel et Espace, l'aspect architectural du projet étant un critère important de choix du jury;

◆ d'un cabinet paysagiste : Alliod, du fait de sa connaissance des paysages de Lorraine;

◆ d'une société de terrassement du groupe Eiffage : SFET (Société Forézienne d'Entreprises et de Terrassement), car la part terrassements s'avérait importante dans le projet : déblais à l'ouest et remblais très élevés à l'est.

Le groupement s'est adjoint un conseiller géotechnique (Terrasol) et un spécialiste environnement (Setec International).

Sur les bases d'un référentiel précis, le groupement a franchi de juin 2000 à juin 2002 les étapes successives : APD (avant-projet détaillé), PRO (phase projet), mise au point du marché et a reçu l'ordre de service de démarrage des travaux au 2 septembre 2002. Dans toutes ces phases, il a été son propre maître d'œuvre, comme le prévoyait le règlement du concours.

Sa compétence en matière ferroviaire (participation à de nombreux ouvrages des lignes nouvelles précédentes) a permis au groupement d'élaborer un projet technique respectant tous les critères du référentiel technique : vitesse de base, critères de confort et de durabilité, sécurité de circulation (dilatation, freinage), comportement dynamique, facilité d'entretien.

Une optimisation poussée des structures au niveau du projet a permis de rendre compétitive pour le ta-

blier une structure mixte bi-caisson, solution innovante pour des portées importantes de l'ordre de 73 m et plus esthétique que le traditionnel bipoutre (figure 4).

Le site très protégé, avec des contraintes environnementales très fortes, a obligé le groupement à travailler très en l'amont et en détail sur des sujets habituellement réservés à la maîtrise d'œuvre avant l'appel d'offres classique :

◆ impact des terrassements sur la faune et l'environnement : passages petite et grande faune, bassins de recueil et de décantation, habillage paysagiste, respect de la loi sur l'eau et des contraintes sur le parc naturel régional de Lorraine;

◆ même soucis au niveau du choix de l'implantation des pistes et des installations de chantier;

◆ incorporation de l'architecture du projet au site; le travail des architectes s'est particulièrement développé au niveau de la conception des piles et des culées, du garde-ballast, du bon équilibre des portées;

◆ choix des méthodes :

- seulement six piles (dont la plus haute est à 50 m par rapport au point le plus bas de la vallée du Rupt de Mad), réalisées par groupe de deux à l'aide d'une grue à tour et d'un coffrage grim pant de 4,00 m : l'impact au sol est très réduit,

- poussage du tablier de l'ouest vers l'est à partir d'un banc de poussage encastré et intégré au tracé du lot voisin; le hourdis béton sera réalisé à l'aide d'un équipage, sans intervention au sol.

Au fur et à mesure des phases d'avancement du concours, le travail de tous a fait mûrir le projet et lui a donné la qualité requise :

◆ sur le plan économique :

- l'optimisation de la travure a été obtenue : 60,50 m; 73,80 m x 4; 65,60 m; 57,40 m (figure 5),

- l'approvisionnement des remblais a été trouvé au moindre coût,

- les dépôts ont également été trouvés à la satisfaction des responsables locaux,

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS

### Terrassements ouest

- Déblais : 25 000 m<sup>3</sup>
- Remblais : 23 000 m<sup>3</sup>

### Terrassements Est

- Déblais : 680 000 m<sup>3</sup>
- Remblais : 480 000 m<sup>3</sup>

### Génie civil

- Béton : 11 000 m<sup>3</sup>
- Aciers HA : 1 100 t
- Etanchéité : 5 700 m<sup>2</sup>

### Charpente métallique

3 000 t

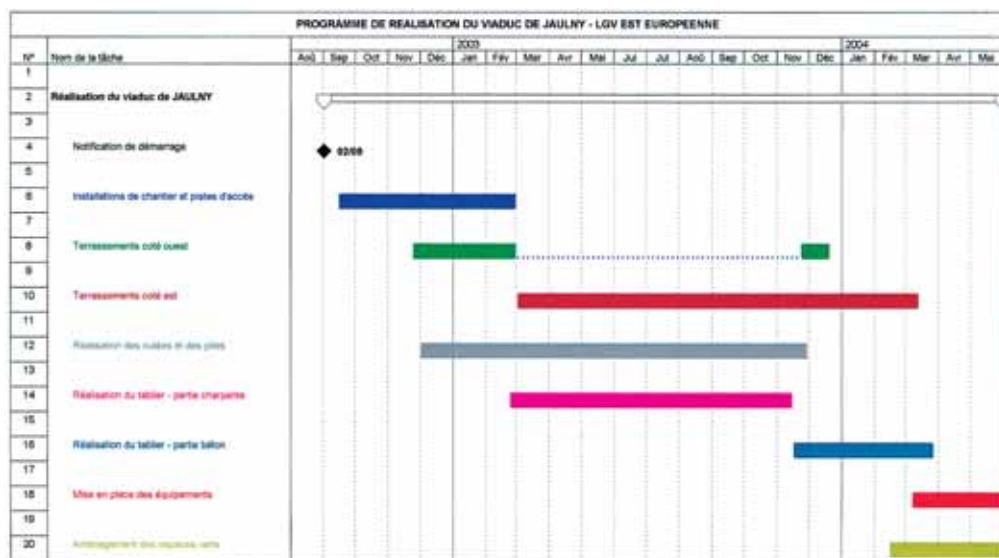


Figure 6  
Programme prévisionnel des travaux

Projected work schedule

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### Maître d'ouvrage

Réseau Ferré de France

### Conducteur d'opération

Scetauroute - Agence de Nancy

### Maîtrise d'œuvre travaux

Groupement :

- Eiffage TP (mandataire)
- Victor Buyck Steel Construction (tablier métallique)
- Société Forézienne d'Entreprises et de Travaux (terrassements)
- Setec TPI (conception - contrôle externe)
- Architecture Neel (architecte)
- Espace (architecte)
- Cabinet Alliod (aménagement paysagers)

Groupement titulaire du marché Cf. ci-dessus

### Principaux sous-traitants et fournisseurs

- Conseiller géotechnique : Terrasol
- Etudes génie civil et béton armé : Secoa
- Etudes charpente métallique : Setec TPI
- Bétons : Holcim
- Aciers HA : SAMT
- Coffrages des piles : Ersem
- Ouvrage provisoire : Leduc
- Pieux : Durmeyer

- les emprises provisoires et définitives ont été réduites au maximum et négociées avec tous les exploitants et propriétaires ;

◆ sur le plan de la sécurité, une notice particulière de sécurité ferroviaire a été établie avec les responsables SNCF de la ligne en service, en liaison avec les responsables sécurité de RFF ;

◆ sur le plan ferroviaire les futurs utilisateurs ont défini leurs exigences qui ont été intégrées dans le projet (entretien, accès, passerelle Moog, etc.) ;

◆ sur le plan de l'assurance qualité, tant au niveau des études d'exécution qu'au niveau des travaux, le groupement s'est engagé, au travers d'un S.D.Q (schéma directeur de la qualité) détaillé et précis, dans une démarche de maîtrise d'œuvre et de contrôles internes et externes qui donne toute garantie au maître d'ouvrage RFF.

## LE DÉROULEMENT DES TRAVAUX

L'ordre de service de démarrer les travaux a été donné le 2 septembre 2002. Le délai de réalisation est de 21 mois (figure 6).

### Les travaux préparatoires

Ils revêtent pour ce projet une grande importance :  
◆ déboisement ; zone très pentue dans la partie CO/P1 à l'ouest ; zone très boisée du bois du Fey à l'est (P6, C7, remblai Est) et haut lieu de lutte pendant la dernière guerre ; travaux à effectuer en contact permanent avec les services de déminage ;

◆ contact avec les riverains et propriétaires pour l'indemnisation des emprises temporaires ;

◆ passage préalable des services archéologiques ; des vestiges carolingiens ont pu être identifiés dans la zone P3/P4 ; des vestiges gallo-romains et des vestiges de guerre ont été reconnus dans les bois du Fey ;

◆ protection des essences rares et des zones protégées et sensibles sur le plan européen ;

◆ recherche de cavités karstiques ou d'anciennes galeries militaires par sondages destructifs et me-

sures microgravimétriques, au cours d'une campagne géotechnique complémentaire effectuée en tout début de chantier ;

◆ réalisation d'un linéaire important de pistes d'accès aux appuis dans un site inondable ; un ouvrage provisoire est mis en place en fond de vallée sur le Rupt de Mad pour réaliser la pile P2. Ces pistes sont à réaliser avec l'accord des autorités locales et des propriétaires ou exploitants ;

◆ réalisation d'installations de chantier aussi discrètes que possible dans le site ;

◆ mise au point définitive des dépôts pour les excédents de déblais avec toutes les obligations administratives qui caractérisent cette démarche ;

◆ confortement de certains appuis et notamment de la pile P1 par béton projeté et ancrages.

### Les travaux de génie civil

Les appuis C0 à P6 (béton B32) sont fondés sur semelles superficielles, sur le calcaire de bonne qualité. Des précautions particulières sont prises pour les fouilles de P4 et P5 à proximité de la voie ferrée.

La pile P2 (figure 7), très proche du Rupt de Mad, exige un batardeau pour la réalisation de la semelle. La culée C7 sera fondée sur six pieux Ø 1 200, forés et tubés à partir du niveau supérieur du remblai Est. Leur longueur sera de 25 m.

Comme vu précédemment, les fûts de piles sont réalisés à l'aide de deux coffrages outils métalliques grimpants, manutentionnés à la grue à tour, et permettant des levées de 4,00 m.

La pile P6 est double ; elle encaisse une grande partie des efforts horizontaux du tablier grâce à une butée fixe métallique du tablier. Les appareils d'appui des autres appuis sont des appareils classiques à pot.

Le contraste architectural de couleurs entre les parties claires du fût de pile et les parties foncées du chevêtre est obtenu, pour les parties foncées, par un colorant dans la masse du béton (1,8 % du poids du ciment).

Certains éléments des piles sont préfabriqués sur site (parement des chevêtres, prédalles).

Le hourdis béton (épaisseur 40 cm, béton B35) du tablier mixte est réalisé classiquement à l'aide de deux équipages mobiles métalliques ne coffrant que les encorbellements ; la partie centrale entre les deux caissons métalliques est équipée de prédalles non participantes (portée 2,30 m) qui servent de coffrage perdu ; les cages d'armatures sont mises en place sur l'aire de lancement du tablier et poussées avec les caissons métalliques. Cette méthode permet un gain de temps appréciable et évite des interventions depuis le sol ou au-dessus de la voie ferrée en service.

Les équipements ou protections de l'ouvrage sont classiques en matière ferroviaire. Notons que la forme retenue pour l'écran garde-ballast s'adapte

parfaitement à l'usage de l'engin d'inspection Moog de la SNCF actuellement en service.

L'évacuation des eaux du tablier se fait à l'aide d'un caniveau latéral débouchant sur la culée C0; la pente transversale de la face supérieure des caissons est de 4 %.

Un joint garde-ballast lourd est prévu sur la culée C0, permettant un soufflé de l'ordre de 40 cm; côté C7 les dilatations permettent la mise en place d'un joint classique à couteaux.

### Les travaux de terrassement

Les déblais sont exécutés de façon classique : pelle et tombereaux, boteurs avec *ripper*, parfois à l'explosif.

Un déblai/remblai important à l'ouest derrière la culée C0 permettra de réaliser dans un premier temps le banc de poussage du tablier métallique. Le niveau final de la plate-forme sera rétabli après poussage.

Un remblai très important (jusqu'à 25 m de hauteur au droit de C7) permettra de faire la jonction entre le lot J et le lot 32; il comportera deux niveaux de risbermes. L'emprunt se fera dans la partie réutilisable des déblais du lot adjacent.

Le lot terrassement comporte également la réalisation d'un OH Ø 2000, de deux passages petite faune, des bassins de rétention et des fossés nécessaires à l'assainissement du projet.

### Les travaux de charpente métallique

La membrane inférieure d'un caisson a une largeur de 2,25 m; la membrane supérieure a une largeur projetée sur l'horizontale de 3,00 m.

Les âmes et les membranes sont constituées de tôles minces raidies dont les épaisseurs varient de :

- ◆ 20 mm à 50 mm pour la membrane supérieure;
- ◆ 20 mm à 80 mm pour la membrane inférieure;
- ◆ 14 mm à 18 mm pour les âmes des caissons.

Les augets d'épaisseur 7 mm, de hauteur 275 mm et de largeur 200 mm stabilisent la tôle supérieure des caissons lors des phases de lancement et lors du coulage du hourdis béton.

Les deux caissons, rigides en flexion et en torsion sont entretoisés sur appui par des diaphragmes complets, percés de trois ouvertures pour permettre la visite et l'entretien de l'intérieur des caissons et de l'espace situé entre ces caissons.

Les entretoises en travée sont limitées au nombre de trois pour les travées courantes et de deux pour les travées de rive. Situées en partie basse du caisson, elles sont constituées de PRS de hauteur 1,00 m et de largeur 0,40 m.

Des diaphragmes, espacés tous les 4,10 m, sont disposés à l'intérieur du caisson. Ils permettent la conservation de la géométrie du caisson, la mise

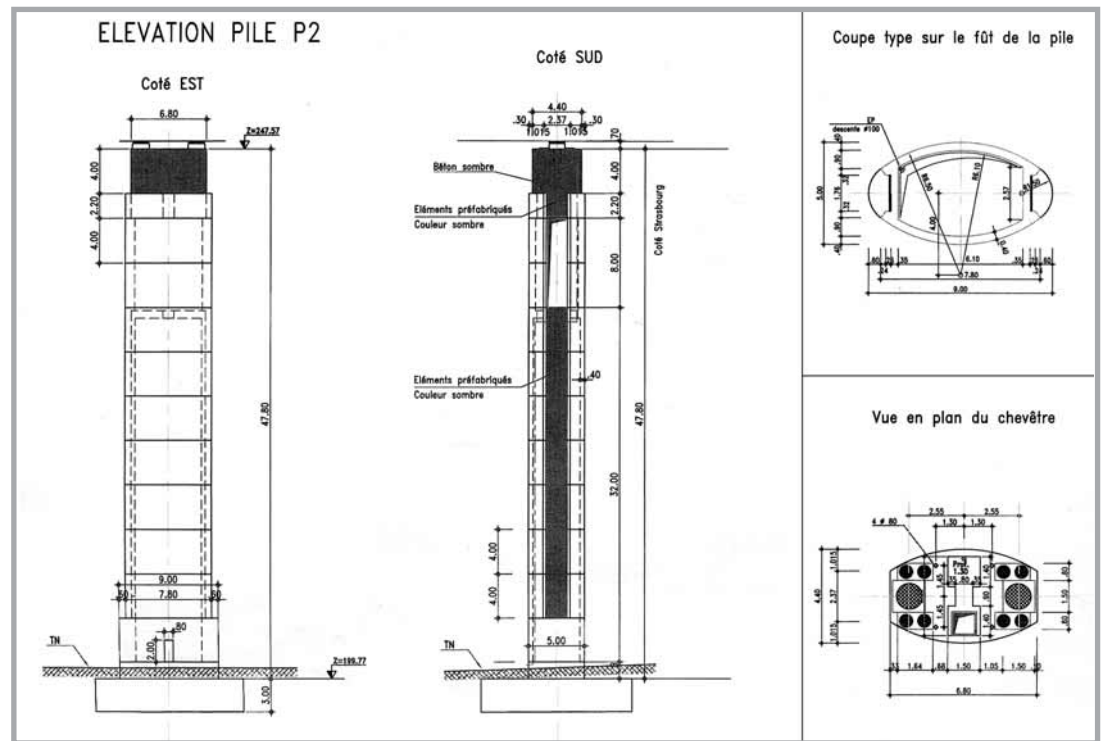


Figure 7  
Piles du viaduc  
Viaduct piers

en position des tôles (âmes et semelles) lors de la fabrication et l'appui des raidisseurs longitudinaux. Ils sont largement échancrés pour permettre le passage des hommes et des matériels éventuels lors de la visite de l'intérieur des caissons.

Les études statique et dynamique ont permis de réduire les liaisons importantes entre les deux caissons en zone courante à l'exception des zones d'appui où elles sont conservées pour permettre la transmission des efforts horizontaux de freinage, dilatation et force centrifuge ainsi que le vérinage occasionnel des appuis définitifs.

Les conditions de déformations ont été étudiées pour une vitesse de référence de 350 km/h (limitation des flèches, rotations, grandissement).

Les aciers constitutifs sont choisis parmi les aciers S355 K2G3 pour les épaisseurs inférieures ou égales à 30 mm, S355 N pour les épaisseurs comprises entre 30 mm à 80 mm, et S355 NL pour les épaissements supérieurs à 80 mm.

Les assemblages de la charpente métallique sont des assemblages soudés.

Les accessoires et support des caillebotis sont réalisés en S 235 JO.

La résistance à la fatigue de l'ouvrage a été prise en compte dès la phase de conception.

Au niveau de la détermination des portées maximales et de la répartition des travées tout d'abord. Le nombre de grandes travées, leur portée, permettent de vérifier que la vitesse critique, au-delà de laquelle des phénomènes de résonance apparaissent, reste nettement supérieure à la vitesse requise dans le référentiel technique (vitesse de référence majorée de 50 km/h). En ce sens, la résistance à la fatigue a joué un rôle dans la conception générale du viaduc.

Les caissons constitutifs sont entièrement préfabriqués en usine en 20 tronçons d'une longueur

maximale de 28 m. Ils reçoivent deux couches de peinture extérieure.

Ils sont acheminés en convois exceptionnels (environ 2 x 20 tronçons) sur le site et déchargés sur la plate-forme aménagée à l'ouest de la culée C0, dans l'emprise des terrassements.

Les entretoises et diaphragmes intermédiaires d'après sont également préfabriqués en atelier de façon à limiter le nombre de joints à réaliser sur le chantier. Tous ces tronçons sont montés l'un vis-à-vis de l'autre à blanc en atelier.

La mise en place du tablier est réalisée par lancement sur patins glissants, à partir de l'aire d'assemblage réalisée à l'ouest de C0.

Les tronçons reçoivent une contre-flèche de fabrication afin d'obtenir une géométrie finale satisfaisante.

La longueur des travées de lancement sera au maximum de 155 m, afin de limiter à quatre le nombre de phases de lancement, et pour que le tablier, en phase d'attente, présente toujours des conditions d'appui satisfaisantes, notamment vis-à-vis des efforts de vent.

Pour diminuer et compenser la déformation à l'extrémité du porte-à-faux de 73,80 m, un avant-bec de 16 m de long (poids 20 t) est mis en place à l'extrémité du tablier. Le profil de la semelle inférieure de cet avant-bec est parabolique de façon à permettre la remontée de l'extrémité de 1,5 m environ afin de garantir un accostage correct sur les piles.

Sur l'aire de montage, les tronçons sont posés sur deux longrines de montage (longueur 150 m) en béton coffrées par une plaque métallique qui reçoit les appuis néoprène - Téflon®. Le glissement du tronçon s'effectuera sur des appuis néoprène - Téflon® disposés sur les longrines.

En tête des piles, les caissons sont portés par des appuis de type balançoires, pouvant s'adapter à la rotation longitudinale du tablier. Les balançoires assurent également le guidage transversal du caisson lors des opérations de lancement.

Le lancement sera effectué par deux vérins prenant appui sur les longrines de béton armé situées en arrière de C0. L'effort horizontal de lancement est transmis au tablier par un joug de lancement bi-articulé. Le tablier sera guidé pendant le lancement dans le sens longitudinal et transversal.

### ABSTRACT

Design and Build competitive bidding for the Jaulny viaduct East European High-Speed Train Line

*P. Charlon*

The Jaulny viaduct is located on the East European High-Speed Train Line (from Vaires to Baudrecourt) in the Meurthe-et-Moselle region, in the localities of Thiaucourt and Jaulny, and crosses the Rupt de Mad Valley.

The work involves, in the west, earth cuts and backfills for access to the viaduct over a length of approximately 200 m, and in the east, earth cuts and backfills for access to the viaduct over a length of approximately 1,300 m.

The viaduct, made of a combined steel-concrete double caisson, is approximately 479 m long and passes 50 metres above the Rupt de Mad and the Paris-Metz railway line. This structure consists of seven spans and has a cross section with two traffic lanes.

Réseau Ferré de France chose a new and innovative formula for awarding the design, project management and works : Design and Build competitive bidding, which provides the contracting authority with optimum guarantees of completion and the contractor with better consistency of design and construction.

### RESUMEN ESPAÑOL

Concurso de diseño y ejecución para el viaducto de Jaulny Línea de alta velocidad Este europea

*P. Charlon*

El viaducto de Jaulny está ubicado en la línea de alta velocidad del TGV este europeo (de Vaires a Baudrecourt) en el departamento de Meurthe et Moselle, en los municipios de Thiaucourt y Jaulny y salva el valle del Rupt de Mad.

Las obras incluyen, por la parte oeste, las operaciones de movimiento de tierras (desmontes y terraplenes) de acceso al viaducto sobre una longitud de unos 200 m, y por la parte este el mismo género de trabajos para dar acceso al viaducto sobre una longitud de 1300 m, aproximadamente.

El viaducto, en bicajón mixto acero-hor-

migón presenta una longitud de 479 m, aproximadamente, y pasa a 50 m por encima del Rupt de Mad y de la línea ferroviaria Paris-Metz. Esta estructura consta de siete tramos y presenta un perfil transversal para dos vías de circulación.

Réseau Ferré de France ha optado por una nueva e innovadora fórmula para la atribución del concepto de la dirección técnica y de las obras : el concurso "concepto-ejecución" que permite obtener a la empresa propietaria las mejores garantías de terminación y a la propia empresa constructora una mejor adecuación entre el diseño y la ejecución.

# Viaduc de l'Anguienne

## Conception d'un ouvrage atypique

Yves Maury

DIRECTEUR TECHNIQUE  
INFRASTRUCTURES  
Ingérop



L'ouvrage de franchissement de la vallée de l'Anguienne fait partie de la construction de la rocade Est de la ville d'Angoulême réalisée par le Conseil général de la Charente, maître d'ouvrage.

Cette rocade à 2 x 2 voies fait l'objet d'une première phase de travaux restreinte à une seule chaussée exploitée provisoirement de façon bidirectionnelle.

La configuration topographique permet d'inscrire cette déviation sans avoir recours à de grands déblais/remblais ou ouvrages exceptionnels à l'exception, notable, du franchissement de la vallée de l'Anguienne (photo 1).

Cela engendre un ouvrage de 400 m de longueur à 45 m de hauteur, dans un site précieux et délicat, et en vision directe des remparts de la vieille ville d'Angoulême.

Conscient de l'enjeu le Conseil général a souhaité un ouvrage de grande qualité, valorisant le site, et pour cela a lancé un concours de maîtrise d'œuvre complète allant de la conception technique et architecturale jusqu'à la réception des travaux.

Le présent article a pour objet d'illustrer les différentes étapes de la conception ayant conduit à l'ouvrage en cours de réalisation.

Crédits-photos : Charles Lavigne

### ■ DONNÉES DE BASE

La vallée de l'Anguienne est encadrée de deux versants boisés riches en gibier, agréables lieux de promenade et réserves de chasse, constitués de roches calcaires à forte présence de karsts. Les nombreuses grottes troglodytes propres à cet environnement servent d'ailleurs de refuge à de multiples variétés de chauve-souris.

En fond de vallée le substratum calcaire est recouvert de 8 m de tourbe noire de faibles caractéristiques mécaniques.

L'écoulement de l'Anguienne s'agrément de pièces d'eau parsemant de paisibles pâturages.

Enfin une voie communale, largement fréquentée par les adeptes du grand air le week-end, serpente le long de la vallée.

Géométriquement la brèche peut être synthétisée en un entablement, de l'ordre de 180 m d'ouverture, encadré par deux versants fortement boisés, de pente moyenne de 1 en hauteur pour 3 en longueur.

La voie de franchissement, perpendiculaire à la vallée est portée par un tablier de 11 m de largeur utile.

En phase définitive il est prévu de doubler l'ouvrage par un ouvrage identique parallèle au premier.



Photo 1  
Plan de situation  
Location drawing

### ■ CONCOURS DE MAÎTRISE D'ŒUVRE

Le règlement du concours de maîtrise d'œuvre demandait de proposer trois solutions de franchissement :

- ◆ une solution dite "économique", offrant toutefois une bonne qualité architecturale ;
- ◆ une solution dite "architecturale", mais maîtrisant le risque technique ;
- ◆ une solution dite "intermédiaire", offrant le meilleur

Photo 2  
Solution économique

*Economic solution*



Photo 3  
Solution économique

*Economic solution*



► compromis entre les deux exigences précédentes. Le groupement constitué par Ingérop (mandataire) - Safège - Charles Lavigne (architecte) a été classé premier en solution "économique", premier en solution "architecturale", second en solution "intermédiaire". Au vu de ces propositions le maître d'ouvrage a choisi de privilégier la solution "architecturale" du groupement.

## ■ CONCEPTS PROPOSÉS

Les solutions conçues par le groupement résultent des réflexions suivantes :

Le programme du viaduc et du contournement Est d'Angoulême envisage une réalisation en deux tranches ce qui signifie un doublement du viaduc à terme.

Ce phasage dans le temps élimine d'emblée les superstructures porteuses situées au-dessus du tablier, telles que : ponts à haubans, bow-string ou poutres treillis latérales qui s'accordent mal d'un doublement. En effet, la juxtaposition de ces structures en deuxième phase donne une lecture compliquée et une intégration médiocre de l'ensemble dans le site.

Par ailleurs il est acté que la qualité d'un ouvrage d'art résulte davantage du travail sur les structures et de ses conséquences sur l'apurement des lignes plutôt que d'une architecture au décor inutilement rapporté.

## Solution dite "économique"

Après un balayage comparatif des solutions faisant appel à des tabliers à structure béton ou mixte et des travées de différentes portées, il est rapidement apparu qu'une structure de tablier à ossature mixte avec des piles verticales s'imposait comme une solution particulièrement économique (photo 2).

Dans cet esprit il a été proposé une solution simple et rationnelle avec :

- ◆ une longueur d'ouvrage optimisée à 400 m ;
- ◆ un tablier aux lignes pures et tendues de 3,55 m de hauteur ;
- ◆ un jeu de piles verticales implantées régulièrement, aussi espacées que possible ;
- ◆ des portées de 90 m restant dans le domaine économique.

Le tablier est constitué de poutres métalliques entretoisées de hauteur constante avec un hourdis en béton armé. Les poutres sont mises en couleur dans une teinte vert sombre laissant parler le paysage.

La rive d'ouvrage intègre une barrière de sécurité BN4, un écran acoustique et une corniche-caniveau. Cet ensemble est traité dans une teinte blanche pour signifier sa fonction technique et pour souligner le mouvement général de l'ouvrage (photo 3). Les travées sont réparties en cinq portées qui dessinent des ouvertures aux proportions dynamiques allongées dans le sens de l'ouvrage. Les deux grandes piles principales cadrent symétriquement le cours de l'Anguienne et les piles latérales, de hauteurs équivalentes, sont situées à mi-versant. Les piles sont conçues avec un fût unique à partir d'un plan ovale. Les levées de bétonnage sont en béton lisse et bien marquées par des joints creux. La partie supérieure est traitée avec un effet de fourche en direction des appuis. Cette conception a été préférée à des piles-colonnes sous chaque poutre pour une meilleure intégration, en particulier lors du doublement pour éviter le quadruplement des piles.

## Solution dite "architecturale"

L'approche sensible de l'ambiance du site, les formes douces du paysage et le caractère naturel des lieux ont orienté le parti architectural dans un registre de formes arrondies. Le dessin en arc est apparu comme une réponse naturelle et instinctive.

Cependant, un arc unique est une démarche quelque peu simpliste et inutile : il n'y a pas d'impératifs





Photo 4  
Solution  
architecturale  
*Architectural  
solution*

réels à rechercher une grande portée puisqu'il est tout à fait possible d'implanter ces appuis dans la partie centrale de la vallée.

Il a été proposé, dans le cadre d'une solution très architecturée, une structure basée sur deux demi-arcs croisés avec une structure centrale très fine du tablier. Les demi-arcs prennent naissance dans le fond de la vallée pour se terminer horizontalement dans les versants (photo 4).

La partie centrale du tablier au-dessus des arcs est très aérienne, soutenue par de fines colonnes métalliques qui s'appuient sur les arcs.

Les piles latérales sont traitées avec des volumétries simples à l'aplomb des arcs.

Aux naissances des arcs en fond de vallée, le cours de l'Anguienne est élargi pour former un plan d'eau qui viendra enrichir le paysage sans déplacer le lit du ruisseau ni modifier les limites communales (photo 5).

La longueur de l'ouvrage est optimisée à 400 m. Les remblais d'accès seront très peu perçus car noyés dans les boisements de part et d'autre.

La portion centrale fait 195 m de long et est constituée d'une structure porteuse (arcs croisés) en caisson béton armé de 6 m de large pour 4 m de hauteur. Dans cette zone le tablier proprement dit est une dalle en béton précontraint de 90 cm d'épaisseur portée tous les 30 m par des paires de poteaux descendant.

Au-delà l'ensemble se continue tout naturellement à l'aide d'un tablier en caisson béton précontraint, dont les portées décroissent de 70 m à 35 m, reprenant les formes extérieures des arcs et des encorbellements du tablier-dalle.

L'effort de poussée d'"arc" est repris par la précontrainte longitudinale ancrée aux extrémités du tablier "dalle".



Photo 5  
Solution  
architecturale  
*Architectural  
solution*



Photo 6  
Solution  
intermédiaire  
*Interim solution*

### Solution dite "intermédiaire"

Dans le cadre de la solution intermédiaire, il a été proposé un ouvrage dont le parti architectural résulte d'un équilibre entre une approche sensible du site et une conception structurelle très affirmée. L'idée d'harmonie entre une expression plastique et une répartition de portées raisonnable a conduit à imaginer un tablier de hauteur constante avec en partie centrale deux piles en V (photo 6). Cet agencement confère à l'ensemble une impression d'équilibre et de stabilité. Cette conception permet de réduire les portées (et donc le coût) tout en limitant les implantations dans la vallée. Il

► en résulte une silhouette originale, simple, élancée et dynamique.

Le tablier est un caisson en béton précontraint, de hauteur constante avec des encorbellements prononcés. Les piles principales sont encastrées dans le tablier. Elles comportent des arêtes vives qui se poursuivent sur les âmes inclinées du caisson pour exprimer l'encastrement. Ces formes très simples joueront par effet de facettes dans l'ombre et la lumière.

Les piles latérales sont traitées avec des volumétries simples à l'aplomb du caisson du tablier. Elles sont en béton lisse et les levées de bétonnage sont soulignées par des joints creux horizontaux bien marqués.

Les portées ressortent à 30 – 45 – 82,50 – 120 – 82,50 – 40, étant considéré ici l'arc des fondations des béquilles et non leurs extrémités hautes (ouverture de 45 m).

Le tablier fait 4 m de haut pour une largeur de caisson de 6 m.



Photo 7  
Tirants aériens  
*Aerial tension members*

## ■ OPTIMISATION DU PROJET

Lors du concours le groupement a utilisé le retour d'expériences acquis sur des ponts en arc traditionnels, travées uniques reportant la poussée de l'arc sur leurs fondations.

Or plusieurs paramètres spécifiques, provenant du croisement des arcs, amènent à concevoir en phase projet des variations par rapport aux dispositions usuelles :

- ◆ en pied, sur le double appui axial, la faible distance entre les naissances des deux demi-arcs permet de les relier par un tirant rigide, ce qui évite tout report de charges horizontales significatives dans les fondations ;

- ◆ au croisement des arcs, l'encastrement réciproque interdit tout mouvement entre les deux demi-arcs ce qui milite aussi pour la réalisation d'un tirant de liaison rigide entre les naissances afin de "fermer" structurellement et de façon homogène le "triangle" de base de la structure ;

- ◆ en tête la poussée d'un demi-arc est équilibrée par la poussée de l'autre demi-arc à plus de 180 m de distance, ce qui pose, lui aussi, le problème d'une liaison rigide ;

- ◆ enfin, transversalement les parties libres des arcs ne font que 97,50 m, à comparer au double de la longueur horizontale d'un demi-arc c'est-à-dire 226 m.

### Liaison rigide en tête des arcs

La liaison rigide entre les naissances, prévue au concours à l'aide d'un tirant en béton précontraint a été confirmée par les études de projet du fait de son caractère de simplicité.

### Section transversale des arcs

Par contre la section transversale de l'arc a pu être simplifiée du fait de la réduction de la partie "libre" précédemment évoquée, qui passe de 226 m à moins de 98 m, ce qui engendre une chute significative des sollicitations de torsion.

Ainsi le caisson de 6 m de largeur par 4 m de hauteur est remplacé avantageusement par une section en H composée de deux nervures verticales de 4 m de hauteur pour 80 cm de largeur chacune, reliées par un voile médian de 20 cm, l'ensemble s'inscrivant dans les 6 m de largeur initiaux.

Outre l'optimisation des quantités cette section ouverte permet une optimisation des méthodes de réalisation, surtout dans l'optique d'une construction sur cintre général, option de base retenue par le groupement vu le faible linéaire de l'ouvrage et l'avantage de pouvoir se fonder à faible profondeur sous le terrain naturel, sur toute la longueur du pont.

### Reprise des efforts d'arc

La gestion de la reprise des efforts horizontaux d'arc (la poussée de l'arc) a fait l'objet d'échanges importants avec le maître d'ouvrage. Il est de fait que le problème est loin d'être trivial et nous tentons ici de le résumer en quelques mots.

Au stade du concours il est patent que les analyses détaillées du phasage de réalisation ne peuvent être conduites, ne serait-ce que pour des questions de délai.

Les quantités de précontrainte nécessaires pour équilibrer d'une part la poussée d'arc, d'autre part les efforts de flexion longitudinale du tablier-dalle ont été évaluées alors, par le biais de calculs globaux sans en avoir pu finement étudier le positionnement des câbles.

Il est à noter que le fonctionnement structurel de la liaison entre demi-arcs, à l'image de ce qui se passe entre leurs naissances, impose à l'évidence un tirant peu déformable axialement.

Cela a conduit lors du concours (choix confirmé lors du projet) à utiliser le pont-dalle comme tirant en connectant la structure supportant le trafic aux extrémités des structures des demi-arcs.

Restait à ajuster, en corrélation avec le position-

nement des câbles de précontrainte, l'instant de cette connexion.

Deux options sont possibles :

**1** - Réaliser les demi-arcs, tendre des câbles libres équilibrant la poussée puis connecter le tablier-dalle. Cette option se traduit par un décintrement des arcs et des mouvements relatifs entre arcs et pont-dalle, (si celui-ci a été coulé à l'avance) ou par la réalisation de ce pont-dalle sur un ouvrage très déformable puisque la précontrainte de "poussée", (réalisée à l'aide de câbles dont l'allongement est libre sur plus de 200 m) reste de force quasi constante.

Cette option a été rejetée.

**2** - Réaliser sur cintre les demi-arcs puis toujours sur cintre le tablier-dalle, y compris l'encastrement des deux structures, tendre l'ensemble des câbles et décintrer le tout.

Cette option a le mérite de la simplicité technologique, donc l'assurance *in fine* d'une meilleure qualité d'ouvrage.

Elle impose par contre de regarder avec soin l'implantation de la précontrainte pour des raisons détaillées ci-après.

C'est celle qui a été retenue.

## Règles de détermination de la précontrainte

Il apparaît aisément que la double structure arc/dalle se comporte comme un composite si la fibre moyenne de l'arc ne converge pas avec la fibre moyenne du pont-dalle.

Dans ce cas (en l'occurrence le nôtre puisque l'intention architecturale de base ne permettait pas cette convergence), la déformation de la section d'encastrement entre arc et tablier-dalle est la résultante de la combinaison des déformabilités unitaires de l'arc et de la dalle sous l'application d'une force à un emplacement donné (photo 7).

On constate assez facilement que sous effort horizontal :

◆ la dalle est peu déformable suivant l'axe horizontal et assez déformable en flexion ;

◆ l'arc est très déformable suivant l'axe horizontal (qui diverge tout de suite de son axe neutre courbe) et peu déformable en flexion.

Il est ainsi avéré que les déformations axiale et rotationnelle de la section "d'encastrement" résultent d'une transformation matricielle de leurs homologues des sections d'arc et de dalle.

Comme pour l'ensemble du projet le groupement a alors recherché des options garantissant le meilleur contrôle des phénomènes, c'est-à-dire l'obtention de la qualité maximale des structures.

Ce sont :

◆ la dissociation, en étape ultérieure, de la connexion avec les travées de rive afin que la mise en précontrainte des 200 m centraux se fasse sur une structure bien déterminée ;

◆ le positionnement de la résultante générale de la précontrainte sur le centre de gravité "structural" de la section d'encastrement, c'est-à-dire le point d'application qui n'engendre qu'un déplacement sans rotation de cette section, (compensation de l'arc sans moment) ;

◆ le scindement en deux familles de câbles, l'une ondulée dans le corps de la dalle, l'autre rectiligne et extérieure au béton, filant en dessous de la dalle.

L'application de ces principes donne les grandes lignes de la proposition présentée en avant-projet au maître d'ouvrage, où figuraient deux paires de gros câbles parallèles à la dalle, 2,40 m sous son intrados, passant entre les pilettes auxquelles ils sont reliés par des dispositifs anti-vibratiles.



## Comparaison technico-esthétique

Les discussions qui s'en sont ensuivies conduirent à développer un dessin variante de l'ouvrage destiné à illustrer l'impact de l'abandon de la contrainte esthétique initiale (photo 8).

Dans cette occurrence la fibre moyenne de l'arc est remontée pour venir tangenter celle du pont-dalle, ce qui entraîne une "cassure" de l'intrados des nervures à droite de la pile de transition. Cette "cassure" est atténuée visuellement par adjonction d'un arrondi de liaison. *A contrario* la convergence des fibres neutres permet de réintégrer tous les câbles dans le corps de la dalle.

Les deux dessins ainsi réalisés ont été présentés au maître d'ouvrage qui a finalement privilégié la pureté de lignes.

L'élégance affirmée due à la fluidité de la proposition initiale était confirmée définitivement et la présence des câbles aériens était acceptée au vu des exposés techniques faits.

## ■ SYNTHÈSE

Lancé en mars 1999 le concours de maîtrise d'œuvre a permis le développement des différents niveaux d'études et la rédaction des dossiers de consultation du deuxième semestre 1999 à la fin de l'année 2000.

Photo 8  
Tirants dans béton  
*Tension members  
in concrete*

► La consultation des entreprises et la dévolution des travaux se sont faites au premier semestre 2001.

La préparation du chantier et les études d'exécution se sont déroulées pendant le dernier semestre 2001.

Le chantier a démarré en fin d'année 2001 et devrait se terminer au début de l'année 2004.

L'enveloppe financière prévisionnelle maximum du projet du viaduc (travaux, maîtrise d'œuvre et contrôles laboratoires) a été fixée par le maître d'ouvrage à douze millions d'euros.

### ABSTRACT

L'Anguienne viaduct.  
Design of an atypical structure

*Y. Maury*

The structure crossing l'Anguienne Valley forms part of the construction of the eastern ring road for the town of Angoulême carried out by Conseil général de la Charente as contracting authority.

This two-lane dual-carriageway ring road involves an initial phase of work restricted to a single carriageway used temporarily as a two-way road.

Given the topographic configuration, this diversion can be created without requiring major earth cuts/backfills or exceptional structures, with the (notable) exception of the l'Anguienne valley crossing.

This results in a structure 400 m long at a height of 45 m, on a precious, sensitive site, and with a direct view of the ramparts of the old city of Angoulême. Aware of what was at stake, the "Conseil général" decided on a high-quality structure, enhancing the value of the site, and for this purpose launched a competitive bid for turnkey project management ranging from engineering and architectural design through to acceptance of the work.

The present article aims to illustrate the various design stages which led to the structure on which work is in progress.

### RESUMEN ESPAÑOL

Viaducto de Anguienne.  
Diseño de una estructura atípica

*Y. Maury*

La estructura de franqueo del valle del Anguienne forma parte de la construcción de la circunvalación este de la ciudad de Angulema construida por la Diputación General del Charente, empresa contratante.

Esta circunvalación de 2 x 2 canales de tráfico ha sido objeto de una primera etapa de obras, limitada a un solo carril operado provisionalmente de forma bidireccional.

La configuración topográfica permite inscribir esta variante sin tener que recurrir a grandes operaciones de movimientos de tierras (desmontes y terra-

plenes) o bien, de estructuras excepcionales, salvo por lo que se refiere al franqueo del valle del Anguienne.

Todo ello precisa una estructura de 400 m de longitud y 45 m de altura, en un emplazamiento valioso y delicado, desde donde se tiene una vista directa hacia las murallas de la vieja ciudad de Angulema.

Consciente de lo que estaba en juego, la Diputación General ha deseado obtener una estructura de alta calidad, para realzar la belleza de estos parajes y, para ello, ha publicado las bases de un concurso de dirección completa de la operación, que comienza por el establecimiento del concepto técnico y arquitectónico y finaliza por la recepción de las obras ejecutadas.

El presente artículo tiene por objeto ilustrar las diversas etapas del diseño que han conducido a obtener la estructura actualmente en curso de ejecución.