

Travaux

n° 754

TUNNELS - ETRANGER

- Le tunnel immergé du franchissement de l'Øresund entre la Suède et le Danemark. La phase de finalisation
- Métro du Caire. Extension de la ligne 2 et traversée sous fluviale du Nil

TUNNELS - ROUTIERS

- La réparation des tunnels de Virignin sur la RN 504 dans l'Ain

COLLECTEURS

- Forbach (Moselle). Construction d'un collecteur d'eaux usées en souterrain avec reprise des branchements particuliers en service
- L'intercepteur Gennevilliers - Colombes - Nanterre

TUNNELS - ARCHITECTURE

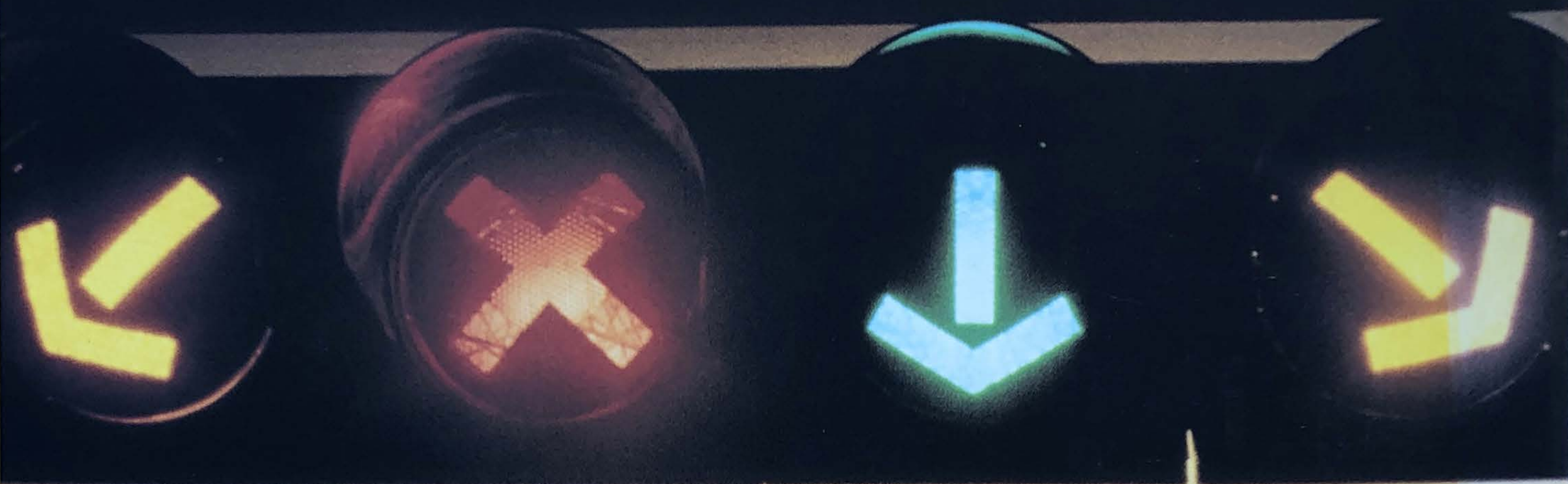
- Le traitement architectural de l'intérieur des tunnels routiers en France

VIADUCS - FRANCE

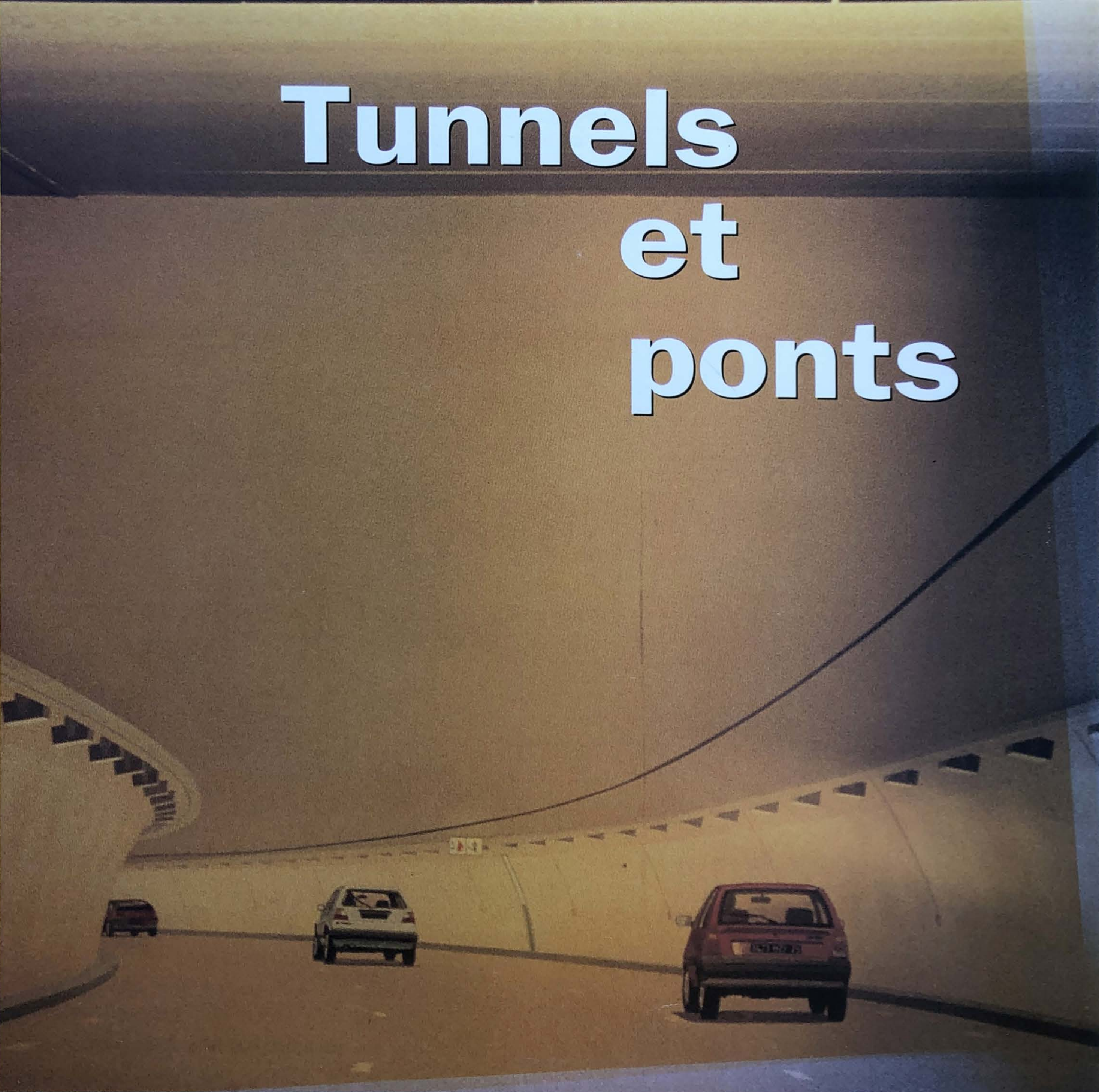
- Le viaduc du Scardon. Contournement d'Abbeville par l'autoroute A16

VIADUCS - ETRANGER

- Pont poussé à géométrie complexe. Cas des viaducs de l'Île Falcon en Suisse



Tunnels et ponts



Daniel Tardy
Président
de la FNTF



Ce numéro de *Travaux*, le cinquième depuis 1995 consacré aux tunnels, n'a pas, si j'ose dire, "fait le plein" et a été complété par deux articles présentant deux ponts, d'ailleurs remarquables. Faut-il y voir une relation avec le titre de Philippe Sardin, dans sa préface du numéro 744 de juillet-août 1998, et que rappelle aujourd'hui Bernard Falconnat : "Des tunnels aujourd'hui,... mais demain ?". Et il ajoutait : "Tout montre en effet que nous vivons en France la fin des grands travaux souterrains (Eole, Météor, TGV Méditerranée, tunnels sous le réseau routier et concédé), alors que nos voisins européens bénéficient de programmes routiers et ferroviaires impressionnants".

Encore cela a-t-il été écrit avant les deux drames survenus récemment dans le tunnel du Mont-Blanc et dans celui des Tauern en Autriche. On évoquait surtout en France le coût des tunnels, outre le fait que l'équipement du pays en infrastructures de transport était déclaré achevé ou presque. Mais voilà que s'ajoute aujourd'hui le thème, beaucoup plus mobilisateur pour l'opinion, de la sécurité.

Faut-il ne plus construire de tunnels ? Fallait-il ne plus construire de ponts suspendus après l'effondrement du pont de Tacoma aux USA, il y a 70 ans ? Ne plus construire de barrages après Malpasset en 1959 ? Fallait-il supprimer l'alimentation en gaz des immeubles après tant d'explosions et d'incendies ?

On sait qu'il n'en a rien été, et que chaque accident a, au contraire, entraîné aussitôt des recherches et des progrès, tant dans la conception que dans la construction et l'exploitation des ouvrages. Et nos lecteurs savent bien aussi que des ouvrages toujours plus importants et plus audacieux ont été construits et continuent d'être construits à travers le monde.

Pourquoi en serait-il autrement pour les tunnels ? Il n'est certes pas étonnant qu'après l'accident du Mont-Blanc des inquiétudes s'expriment (tout récemment Jacques Baumel) et que de nouvelles concertations soient demandées à propos du bouclage de l'A86 à l'Ouest parisien. Mais il y avait déjà eu nombre de contestations et de concertations à propos de ce projet et on peut être sûr que le concessionnaire a déjà satisfait à toutes les réglementations en matière de sécurité.

Comme il s'est appliqué à concevoir un tunnel "anti-stress". Nos lecteurs en auront une idée par la photographie de la page de couverture et liront avec intérêt l'article de Michel Pérard sur le "traitement architectural de l'intérieur des tunnels routiers en France" (page 46).

Quant à nos entreprises, les autres articles montrent qu'elles restent prêtes à construire de nouveaux tunnels – routiers, ferroviaires ou autres – et dans tous les sites, y compris maritimes. Les besoins ne manquent pas, en France, en Europe et au-delà. Car l'homme devra continuer de conquérir et de maîtriser l'espace souterrain quand certains besoins ne peuvent pas, ou ne peuvent plus, être satisfaits en surface : véritables villes souterraines au Canada, franchissement de montagnes, de couloirs maritimes, usines souterraines, métros et, sans doute un jour, autoroutes urbaines souterraines. Si Paris y a renoncé (provisoirement ?), Madrid semble au contraire décidée à construire un "réseau spécial de voies souterraines" à péage de cent kilomètres de longueur.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Tardy', written in a cursive style.



Notre couverture

**A86. Maquette
grandeur nature**

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

RÉDACTION

Roland Girardot et Henry Thonier

3, rue de Berri - 75008 Paris

Tél. : (33) 01 44 13 31 44

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart

Tél. : (33) 02 41 35 09 95

Fax : (33) 02 41 35 09 96

E mail : Francoise.Godart@wanadoo.fr

MAQUETTE

T2B&H

8/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris

Tél. : (33) 01 44 64 84 20

VENTES ET ABBONNEMENTS

Colette Robert

RGRA

9, rue Magellan - 75008 Paris

Tél. : (33) 01 40 73 80 05

E mail :

revue.generale.des.routes.rgra@wanadoo.fr

France : 920 FF TTC

Etranger : 1100 FF

Prix du numéro : 115 FF (+ frais de port)

PUBLICITÉ

Régie Publicité Industrielle

61, bd de Picpus - 75012 Paris

Tél. : (33) 01 44 74 86 36

Imprimerie Chirat

Saint-Just la Pendue (Loire)

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

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

Editions Science et Industrie S.A.

3, rue de Berri - 75008 Paris

Commission paritaire n° 57304



éditorial

Daniel Tardy

1

actualités

6

matériels

11

PRÉFACE

Bernard Falconnat

13

TUNNELS - ETRANGER

◆ Le tunnel immergé du franchissement de l'Øresund entre la Suède et le Danemark. La phase de finalisation - *The immersed Øresund tunnel between Sweden and Denmark. The final phase*

R. Eymery, Br. Francou, Ph. Maldiney

14

◆ Métro du Caire. Extension de la ligne 2 et traversée sous-fluviale du Nil - *Cairo's metro. Extension of line 2 and crossing under the Nile River*

J. Petit, A. Roussin, P. Ramond

22

TUNNELS - ROUTIERS

◆ La réparation des tunnels de Virigin sur la RN 504 dans l'Ain - *Repair of the Virigin tunnels on highway RN 504 in the Ain region*

G. B. Abou Sleiman

33

COLLECTEURS

◆ Forbach (Moselle). Construction d'un collecteur d'eaux usées en souterrain avec reprise des branchements particuliers en service - *Forbach (Moselle). Construction of a wastewater collector underground with the connection of private branches in service*

J.-N. Lasfargue

37

◆ L'intercepteur Gennevilliers - Colombes - Nanterre - *The Gennevilliers - Colombes - Nanterre intersecting sewer*

J.-Ch. Averous, Ph. Pratt

42

Sommaire

juin 1999

Tunnels et ponts

Dans les prochains numéros

Offshore -

Travaux en mer

Terrassements

Autoroute A51

Environnement

International

Ponts

Routes

Travaux urbains

**Réhabilitation
d'ouvrages**

**Sols
et fondations**



TUNNELS - ARCHITECTURE

◆ Le traitement architectural de l'intérieur des tunnels routiers en France

- *Architectural treatment inside road tunnels in France*

M. Pérad

46



VIADUCS - FRANCE

◆ Le viaduc du Scardon. Contournement d'Abbeville par l'autoroute A16

- *The Scardon viaduct. The A16 motorway bypassing Abbeville*

B. Cathelain, J.-L. Sauvageon, J.-C. Dufaut, J. Georges, M. Novarin, P. Aublanc, Y. Jeanjean, M. Placidi, D. Regallet

52



VIADUCS - ETRANGER

◆ Pont poussé à géométrie complexe. Cas des viaducs de l'Île Falcon en Suisse

- *Complex geometry pushed bridge. Case of the viaducts of Île Falcon in Switzerland*

R. Favre, P. Laurencet

57

économie

66

répertoire des fournisseurs

70

Dans sa préface au numéro de l'année 1998 de *Travaux* consacrés aux tunnels, Philippe Sardin, directeur du CETU, avait utilisé un titre prémonitoire "Des tunnels aujourd'hui... mais demain?".

Force est de constater que la situation ne s'est pas améliorée depuis l'année dernière, et que les mises en chantier de tunnels sur le territoire français ont été très rares en une année. Il y a une dizaine d'années les entreprises de travaux publics qui n'étaient pas équipées d'une structure *ad hoc*, se sont dotées d'un département spécialisé en travaux souterrains, parfois avec le sourire condescendant des grands ténors de cette activité. Les perspectives étaient florissantes, et les travaux souterrains étaient présentés comme le nouvel Eldorado de la profession.

Aujourd'hui l'Eldorado s'est transformé en mirage. De nombreux projets ont été abandonnés, certains sont différés, d'autres sont enlisés dans le marais des procédures, d'autres enfin attendent pêle-mêle les réformes des modes de financement, des idées novatrices, ou la fin d'une certaine frilosité. De grands projets vieillissent doucement compactés sur CD Rom, mais ils auront besoin d'un délai de remise en forme avant de pouvoir être réactivés, et transformés en chantiers, lorsqu'ils auront enfin été redécouverts. Quelques lueurs d'espoir existent heureusement, certains projets frémissent de nouveau, mais ces signaux sont bien faibles au vu des capacités de production des entreprises du secteur.

De nombreux, et parfois très grands projets, sont lancés en Europe, et notamment en Allemagne (la longueur cumulée des tunnels routiers va être plus que doublée dans les cinq prochaines années), en Suisse (où les deux grandes percées alpines viennent de passer en phase constructive), en Espagne, Italie, Autriche et au Benelux où les projets ferroviaires sont très actifs. Le continent sud-américain est riche en grands projets d'infrastructure, de même que le continent asiatique. Certes la crise financière récente a laissé ses stigmates, mais les opérations indispensables, et financièrement viables sont relancées.

Les entreprises françaises et l'ingénierie française sont présentes à l'international, et de nombreux succès y ont été enregistrés, comme en témoigne la proportion importante d'articles consacrés à des chantiers à l'étranger dans ce numéro. La présence des entreprises françaises reste toutefois modeste en Europe à quelques exceptions près. Cela est dû bien sûr en partie, à des reliquats de protectionnismes nationaux, à des manques de transparence dans l'application des procédures européennes, qui sont parfois bafouées, aux barrières et aux difficultés liées aux normes souvent rigides, au conservatisme de la technocratie, et à la culture technique.

Mais est-ce bien là les seules raisons ? Sommes-nous à l'écoute des nombreux projets ? Sommes-nous attentifs aux évolutions techniques en cours chez nos voisins ? Cherchons-nous à prendre

conscience de la valeur ajoutée qui pourrait être apportée pour certains projets, et, au-delà, faisons-nous le nécessaire pour essayer de convaincre ? Bien d'autres questions mériteraient d'être posées pour contrecarrer le pessimisme ambiant, ou les fausses idées reçues.

A l'expérience de nombreux projets et contacts internationaux, je pense qu'il y a lieu d'être plus positif et plus moteur. J'observe en effet, que même les pays les plus rigides et bloqués dans leurs systèmes normatifs, et leur culture technique, sont ouverts à d'autres approches techniques, à d'autres technologies, à d'autres idées, pour autant qu'elles soient attrayantes, et qu'elles présentent de réelles valeurs ajoutées. J'observe que ces mêmes pays sont prêts tout d'abord à déroger, puis ensuite à faire évoluer leurs normes, si de bonnes idées sont apportées. De nombreux efforts sont nécessaires pour cela, mais il est inutile de les entreprendre sans une

profonde connaissance linguistique, culturelle et technique, ni un respect du partenaire, de son histoire technique, et de ses modes de pensée.

J'observe par ailleurs que les entreprises françaises accusent un retard inquiétant dans la maîtrise des tunneliers de grand diamètre. Les chantiers nécessitant des tunneliers dans la gamme de 12 à 13 mètres de diamètre sont pléthoriques en Suisse, où ils se sont développés depuis une vingtaine d'années. Les grands projets à Tokyo font appel à des tunneliers de l'ordre de 14 mètres de diamètre. Le chantier du nouveau tunnel sous l'Elbe à Hambourg met en œuvre un tunnelier d'un peu plus de 14 mètres de diamètre, et plusieurs projets allemands verront le jour prochainement avec des caractéristiques similaires.

En France, le BPNL dont le second tube vient d'être mis en service à Lyon, et le bouclage de l'autoroute A86 dont le chan-

tier redémarre, mettent en œuvre des tunneliers dans la gamme de 11 mètres de diamètre, et un projet, aujourd'hui toujours en *stand by*, faisait appel à un tunnelier de près de 14 mètres de diamètre. Mais ces deux expériences dans la gamme des 11 mètres de diamètre seront bien insuffisantes aux entreprises françaises pour affronter leurs concurrents étrangers, et pour gagner les marchés de demain par défaut de projet porteur en France. Des alliances avec des partenaires internationaux seront de plus en plus nécessaires pour être crédibles, comme pour le tunnel de l'Adler en Suisse (diamètre 13,4 mètres) auquel a participé une entreprise française. Mais toutes les entreprises y sont-elles préparées ?

Les enjeux sont importants dans les domaines techniques, l'imagination est nécessaire pour développer de nouveaux modes de financement des projets, et pour rechercher une sécurité accrue. Les hommes de qualité ne manquent pas dans la profession pour relever ces défis, mais un coup de pouce à la conjoncture en France serait une aide certaine, à condition qu'il ne contribue pas à masquer les prises de conscience nécessaires, et les évolutions indispensables.



■ **BERNARD FALCONNAT**

Directeur des Tunnels et Travaux souterrains de Scetauroute

Le tunnel immergé du de l'Øresund entre la Danemark et la Suède

La phase de finalisation

La liaison entre le Danemark et la Suède immédiatement à proximité de l'aéroport international de Copenhague compte parmi les grandes réalisations d'infrastructure qui vont marquer le développement futur de la région, mais aussi influencer sur les grands équilibres européens.

Au plan régional, le rapprochement de deux pôles importants permettra, par effet d'échelle, de nouvelles implantations industrielles et administratives.

La nouvelle région internationale de Copenhague - Malmö possède en effet de sérieux atouts dans les domaines de la santé, de la pharmacie, de l'éducation supérieure et de la recherche qui peuvent en faire une des capitales mondiales de ces secteurs de pointe.

A plus large échelle, c'est l'ensemble de la Scandinavie qui sera directement relié au reste de l'Europe occidentale par des réseaux ferrés et

autoroutiers continus grâce à ce nouveau lien venant deux ans après la mise en service du Storebaelt en juin 1998.

La liaison directe entre l'Al-

lemagne et l'île de Seeland projetée dans les années à venir devrait compléter ce dispositif qui modifiera la géographie et l'économie européenne.



Situation géographique
Geographical location

■ LA CONSTRUCTION EN PHASE FINALE

Un chantier en avance sur le programme

Le 16 mars 1999, soit exactement quarante-quatre mois après la signature du contrat de construction, une cérémonie en présence du ministre danois des Transports, M^{me} Sonja Mikkelsen, et du ministre suédois de l'Industrie M. Björn Rosegren a marqué l'achèvement des travaux de génie civil du tunnel. La jonction entre les deux derniers éléments immergés est en effet terminée, permettant la circulation à travers le tunnel jusqu'à l'île artificielle de Peberholm.

Le premier maillon du lien fixe entre la Suède et le Danemark est donc maintenant à l'abri des plus gros aléas liés à la construction du tunnel.

Cette importante étape a été réalisée avec une avance de deux mois sur le programme initial du groupement et a permis de reprogrammer l'ouverture commerciale du lien fixe pour le 1^{er} juillet 2000, en avance d'environ un semestre sur les estimations d'origine.

Des cadences exceptionnelles

La réussite de ce planning a été possible grâce à des cadences de réalisation exceptionnelles à la fois pour la préfabrication des éléments et pour leur immersion au cours de l'année 1998, et ceci en dépit des multiples incidents propres à tout chantier de cette ampleur qui n'ont pas manqué d'émailler la vie quotidienne du chantier (encadré "Naufrage de l'élément n° 13").

Les éléments ont été produits dans une usine spécialement construite pour le projet où les coulages



des segments de tunnel de 2700 m³ chacun se sont succédés au rythme de deux à trois segments par semaine pendant la majeure partie des années 1997 et 1998. Au cours de l'automne 1998 les immersions se sont succédées à la cadence de deux par mois, incluant la préparation du lit de pose, l'immersion proprement dite et les opérations de remblaiement de la tranchée autour du tunnel et de protection du toit par enrochements.

La qualité de la réalisation

La caractéristique première de cet ouvrage réside dans la qualité de sa réalisation. L'étanchéité du tunnel est assurée par la seule qualité du béton qui doit donc être réalisé sans fissures, la composition et le contrôle des bétons ont fait l'objet d'études spécifiques, et la qualité des parements hautement contrôlée.

Les tolérances d'exécution concernant la géométrie et aussi le respect des enrobages ont été exceptionnellement réduites afin d'assurer au tunnel ses caractéristiques fonctionnelles et de durabilité.

Face à des exigences contractuelles draconiennes (le tunnel doit être dimensionné pour 100 ans, sans maintenance sur la structure), des procédés de fabrication souvent innovants ont été élaborés.

Le contrôle de l'exécution, sur le plan de la qualité, mais aussi de la sécurité et de la protection de l'environnement, ont fait l'objet de procédures rigoureuses, et de nombreux audits internes et externes.

De nombreuses innovations techniques

Un nombre important d'innovations techniques ont été élaborées et mises en pratique ouvrant la voie à de futurs développements. Parmi celles-ci, on peut citer :

- ◆ la réalisation d'une véritable usine de préfabrication pour l'exécution de caissons immergés ;
- ◆ le coulage monolithique de segments de tunnels de 22 m de long et de 2700 m³ de volume de béton ;
- ◆ le poussage de caissons de 55000 tonnes sur longrines revêtues de résine époxy ;
- ◆ la mise en flottaison des caissons dans un bassin surélevé par rapport au niveau de la mer ;
- ◆ la pose des caissons immergés sur lit de gravier réglé dans des tolérances de planéité exceptionnelles ;
- ◆ la procédure d'immersion (cf. infra) ;
- ◆ le réaligement des éléments après immersion ;

franchissement Suède et le Danemark

- ◆ la conception "compacte" du joint de fermeture final décrite ci-après ;
- ◆ les tolérances de réalisation réduites (géométrie des caissons, planéité des joints d'immersion...);
- ◆ le refroidissement du béton pour les parties coulées en place et la modélisation mathématique des contraintes et des risques de fissuration se développant au cours de la maturation du béton.

Un chantier en cours de finition

Avec l'immersion, le 6 janvier 1999, du dernier élément préfabriqué, suivie de l'achèvement à la fin février du bétonnage du joint coulé en place entre les deux derniers éléments, le chantier est véritablement entré dans la phase finale avec les derniers travaux de finitions, l'installation des voies ferrées dans les tubes dédiés au réseau ferroviaire et surtout avec les installations électromécaniques et les systèmes d'automatisation et de gestion centralisée du tunnel.

Cette phase se poursuivra jusqu'à la fin du troisième trimestre 1999, puis les phases de tests et d'opération simulée se succéderont pour chacun des réseaux, pour aboutir à la mise en service commerciale du lien fixe entre le Danemark et la Suède, prévue le 1^{er} juillet 2000.

LES TECHNIQUES MARITIMES

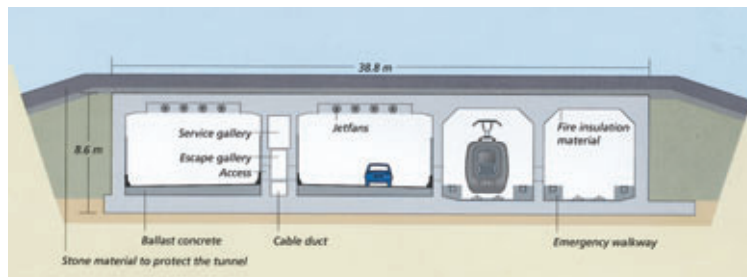
Afin d'assurer une continuité dans la ligne de production de ce vaste projet, les vingt caissons ont été préfabriqués dans une véritable usine couver-

te et fermée située dans le port nord de Copenhague. Leur fabrication à la cote +1,00 m au-dessus du niveau de la mer a fait l'objet d'un précédent article dans *Travaux*, n° 732 de juin 1997. Les opérations maritimes commencent par la pré-



Photo Magasinet, Hellerup

Coupe transversale du tunnel
Cross section of the tunnel



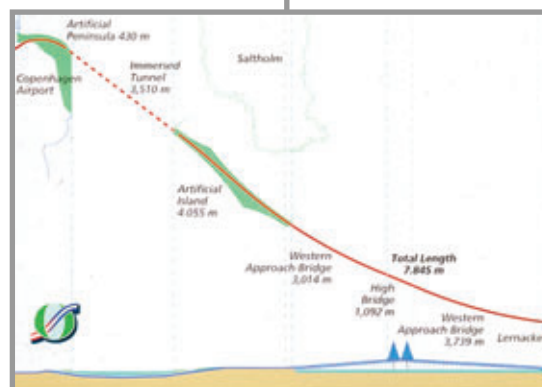
Vue schématique d'un élément composé de huit segments de 22 m de long
Schematic view of an element composed of eight segments 22 m long

UN TUNNEL DE 4 KM DE LONGUEUR, UNE ÎLE ARTIFICIELLE, ET UN VIADUC DE 7,8 KM

L'ensemble du lien fixe de l'Øresund a fait l'objet de trois contrats principaux attribués en "design & construct" au cours de l'année 1995. Il s'agit :

- du tunnel immergé, 4 050 m au total dont 3 515 m en éléments préfabriqués pour un montant de 4 milliards de francs environ ;
- des dragages pour le tunnel, du viaduc, de la constitution de l'île artificielle et de la péninsule gagnée sur la mer en bordure de l'aéroport de Copenhague pour environ 2 milliards de francs ;
- du pont constitué de deux viaducs d'accès ouest et est (22 et 27 travées de 120 à 140 m) et d'un pont à hauban à deux pylônes de 204 m de hauteur au-dessus de la mer pour une travée centrale de 490 m et quatre travées de 160 et 140 m pour environ 6 milliards de francs.

Montant total des travaux : environ 14 milliards de francs y compris les frais financiers.



Les différentes parties du lien fixe
The different parts of the fixed link

Un élément prêt à partir du site de préfabrication

Element ready to leave the precasting site

Robert Eymery
DIRECTEUR DE TRAVAUX
Dumez-GTM

Bruno Francou
INGÉNIEUR
TRAVAUX MARITIMES
Dumez-GTM

Philippe Maldiney
DIRECTEUR DU BLOC
"TUNNEL FINISHING"
Dumez-GTM

**Remorquage
d'un élément
dans l'Øresund**
*Towing of an element
in the Øresund*



Photo Magasinet, Hellerup

DES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS DE 55 000 TONNES

Les vingt caissons préfabriqués constitutifs du tunnel de l'Øresund sont des éléments exceptionnels par leurs dimensions.

Longs de 176 m, larges de plus de 40 m et hauts de 8,75 m, ces éléments coulés en huit segments successifs ne pèsent pas moins de 55 000 t.

Ils sont réalisés dans un moule de préfabrication de 22 m de long cofrant la section complète du tunnel (cinq tubes au total) et sont poussés sur des longrines de glissement au fur et à mesure des huit coulages successifs, et finalement dans le bassin de mise à flot.

Après installation de tous les équipements indispensables à leur immersion (tympan d'extrémité, réservoirs, conduits et pompes de ballastage, tours de positionnement GPS, tour laser, bollards d'amarrage...), ils sont arrimés aux deux pontons d'immersion et finalement, quand les conditions météo sont réunies, pris en charge par quatre remorqueurs de 50 tonnes mobilisables en Scandinavie.

Après une navigation de 15 km dans le détroit de l'Øresund ils arrivent sur la tranchée de pose et sont amarés aux îles d'ancrage avant d'être pivotés transversalement au courant principal. La durée totale de l'opération d'immersion s'est ainsi établie entre 18 et 36 heures en fonction de la distance de halage à réaliser dans la tranchée.

paration des caissons pour leur flottaison dans le bassin de mise à flot spécialement réalisé à cet effet.

Flottaison dans un bassin surélevé

Les éléments, produits par paires, sont préparés à l'extérieur de l'atelier, sur les longrines de poussage au niveau +1,00 m. En l'espace de trois semaines ils sont équipés de leur béton de ballast, des réservoirs de ballastage, de cloisons étanches d'about, du joint Gina d'immersion et des divers équipements de toit : bollards, protections pour le remorquage.

En fin de préparation, la porte arrière, séparant l'aire de préparation de l'usine, et le bateau-porte séparant le bassin de la mer, sont mis en place.

Le bassin peut être rempli. A raison de 17 000 m³/h, l'opération prend 48 heures : les éléments sont mis en flottaison par élévation du niveau de l'eau jusqu'à la cote +9,40 m.

Avec une marge de 20 cm au-dessus du seuil et environ 30 cm de franc bord, les éléments, à l'aide de six treuils de 25 t, sont halés dans le bassin profond dragué à la cote - 10,00 m.

Le bassin est ensuite vidangé, en 40 heures environ, amenant les éléments du niveau +9,40 m au niveau de la mer.

Le bateau-porte peut alors être enlevé pour donner accès à la mer aux éléments.

Construction du lit de gravier piloté par laser

Un autre point majeur du chantier réside dans la réalisation de la fondation des éléments en mer. Cette fondation, d'une épaisseur nominale de 75 cm est réalisée en ballast de granulométrie 30/60, mis en place par un ponton spécialement aménagé : le "ponton multiusage". Ce ponton d'une longueur de 80 m vient se positionner en travers et au-dessus de la tranchée de pose, il s'ancre sur deux pieux plantés dans le fond marin et est équipé d'un tube plongeur de grand diamètre alimenté en gravier par un tapis convoyeur.

Par le déplacement du tube plongeur monté sur chariot le long du ponton, couplé avec le déplacement du ponton par rapport à ses pieux d'ancrage, un lit de gravier est réalisé par passes de 2,65 m, le niveau du ballast étant réglé par asservissement à un plan laser de la plaque de réglage en base du tube, en fonction de la géométrie de la fondation à réaliser, mais aussi en prenant en compte les mouvements du ponton soumis à la houle.

Tolérances et contrôle de la géométrie

Du fait de la grande raideur de la structure en béton armé, la tolérance admissible pour la pose du lit de gravier a dû être réduite à 25 mm sur la surface d'un élément. La plaque de réglage corrige donc sa position à la fréquence de 25 fois par seconde en analysant en instantané sa position par rapport au plan laser et en utilisant des systèmes d'asservissement hydrauliques à grand débit.

Le contrôle de la réalisation du lit de gravier est réalisé après coup par un balayage complet de la surface (avec un maillage de 300 mm) à l'aide de cinq faisceaux haute fréquence installés en pied de tube, celui-ci étant lui même comparé à un plan laser. Les valeurs des niveaux d'appui par zone sont calculées à partir des valeurs données par le nivellement. Ces niveaux de supportage sont comparés entre eux et doivent entrer dans une fourchette de critères précis correspondant aux dénivellées différentielles admissibles par la structure. En cas de non conformité, la couche de gravier peut être rectifiée pour des hors tolérances de 1 à 3 cm.

Prévision des courants, mesures *in situ*

Les courants dans le détroit de l'Øresund varient très rapidement (0,5 m/s de variation en une heure) et peuvent atteindre 2 m/s (période de retour de 10 ans). Les opérations d'immersion ne pouvant avoir lieu que par des courants inférieurs à 0,8 m/s, pendant une période de 24 heures, un modèle de prévision des courants a dû être développé pour le chantier.

Ce modèle, mis au point conjointement par les services météorologiques et hydrographiques danois et suédois utilise le modèle hydrodynamique déterministe Mike 21 pour prévoir les niveaux et les courants dans le détroit sur la base des prévisions météorologiques sur les zones Baltique et Mer du Nord.

Ces prévisions établies toutes les 12 heures sont corrigées en permanence pendant la période à l'aide des mesures sur une vingtaine de sites répartis dans le détroit, et sont disponibles en réseau. Le modèle bénéficie de ces corrections et s'améliore au cours du chantier.

Les précisions (95 % de confiance) obtenues étaient de 0,25 m/s à 12 heures et 0,35 m/s à 24 heures. La valeur des courants sur site était donnée en permanence en deux points par des capteurs ADCP connectés à des bouées émettrices, donnant l'intensité et la direction des courants dans l'ensemble de la colonne d'eau.

Îles d'ancrage

Comme des courants élevés (>1 m/s) peuvent apparaître très rapidement dans le détroit de l'Øresund, la durée de l'ensemble des opérations comprises entre le remorquage et la pose en fond de tranchée a dû être rigoureusement limitée.

Les éléments proches des rives ont dû être halés dans la tranchée de pose sur des longueurs allant jusqu'à 875 m, avec une précision transversale de +/- 3 m, à cause des hauts-fonds. Ceci fut réalisé par treuillage, avec huit lignes d'ancrage de 200 à 500 m et de 65 t de capacité.

Pour limiter le nombre de connexions le groupement a opté pour l'utilisation des îles d'ancrage au lieu des pieux foncés dans le substratum calcaire. Ce choix permet de connecter les huit lignes d'ancrage une seule fois aux îles qui furent ensuite déplacées. Ces îles d'ancrage, spécialement construites pour le chantier, sont des petites plates-formes (*jack-up*) de 30 t, opérant dans des fonds de 5 à 15 m.

En position d'ancrage la coque est hors d'eau. Pour le déplacement la coque est abaissée dans l'eau et les jambes sont relevées. Un remorqueur déplace l'île et la ligne d'ancrage qui reste connectée.

Un total de neuf îles d'ancrage a été utilisé. Cette solution a permis aussi d'optimiser les plans d'ancrage en fonction des conditions spécifiques à chaque élément et de l'expérience acquise en cours de chantier et par conséquent de réduire la durée des opérations d'immersion afin de rester dans la fenêtre de prévision météorologique disponible.

Immersion, ballastage centré

Les immersions ont été réalisées à l'aide de deux pontons d'immersion, catamarans aux coques de 250 m² chacune, équipés de treuils de 35 tonnes mouflés 16 fois, pour une capacité de 450 tonnes. La section intérieure du tunnel et la répartition des tubes ont permis de n'avoir qu'une seule ligne de réservoirs de ballastage, obturant en totalité les voies d'autoroute sud, disposée près du centre de la section de l'ouvrage. Cela minimisa le nombre de réservoirs et facilita les circulations dans les éléments.

En l'absence de réservoirs d'équilibrage transversal, le ballastage en béton préalable était conçu de façon à donner une gîte aux éléments en flotaison. Lors du ballastage en eau pour l'immersion,

Photo Magasinet, Hellerup



Le ponton multiusage installant le lit de gravier
Multi-purpose pontoon installing the gravel bed

Photo Magasinet, Hellerup



Immersion d'un élément.
Vue des pontons d'immersion des îles d'ancrage et des bateaux d'assistance
Immersion of an element.
View of immersion pontoons of the anchoring islands and service boats

cette gîte s'annule et s'inverse, résultant en une charge dissymétrique dans les treuils des pontons d'immersion. Les charges nominales d'immersion étaient de 200 tonnes par ponton. Les variations importantes de salinité dans la tranchée suite à des périodes de courants faibles ont rendu nécessaire par deux fois un second ballastage en cours d'immersion de manière à garder une bonne manœuvrabilité des éléments.

Le positionnement en fin d'immersion par rapport à l'élément précédant est assuré par un guide, actif dans les derniers 70 cm.

Le réaligement

Après vidange de la chambre entre le nouvel élément et le tunnel, et compression du joint Gina, l'alignement du nouvel élément par rapport à l'axe théorique est évalué de deux façons : par visée optique à l'intérieur du tunnel, depuis le portail, et par report vertical de la position de l'antenne GPS implantée en tête de la cheminée d'accès. En cas d'écart de l'axe supérieur à 11 mm, le nouvel élément doit être réaligné.

A cet effet, deux niches sont réalisées dans les faces internes des voiles externes, recevant chacune trois vérins de 500 tonnes. Ces vérins permettent de rouvrir légèrement le joint d'immersion sur un côté, faisant pivoter ainsi l'élément pour le réaligner. Le mouvement est suivi en temps réel par mesure optique relative, par l'intérieur du tunnel. En fin d'opération les vérins sont isolés hydrauliquement.

**Coffrage de la protection
du joint d'immersion
dans un tunnel ferroviaire**

*Shuttering
for the protection
of the immersion joint
in a railway tunnel*



Photo Peter Thornvig

**Bétonnage
des glissières de sécurité**

*Concreting
of crash barriers*



Photo Peter Thornvig

quement et une contre-pression est appliquée dans le voile opposé pour faire face aux effets de relaxation dans le joint pouvant altérer la géométrie. Le phasage des remblais latéraux est aussi utilisé pour améliorer l'alignement.

Le joint de clavage

Le phasage des travaux et la topographie du détroit ont rendu nécessaire la réalisation d'un joint de clavage en mer de 1,2 m de long à une profondeur du radier de 19 m.

Sur le chemin critique des travaux de finition, sa conception a été orientée vers une exécution rapide de l'enveloppe externe.

La première partie des opérations est réalisée par voie marine avec utilisation de plongeurs.

C'est la mise en place du butonage de 5000 tonnes

(constitué de blocs en béton armé équipés de matelas injectés au coulis) puis des panneaux métalliques équipés de joint de caoutchouc afin de constituer l'enceinte étanche entre les deux derniers éléments posés et qui serviront aussi de coffrages au béton des parois externes du tunnel.

La chambre entre les deux derniers éléments est alors vidangée, laissant place à un chantier de génie civil classique en ambiance sèche.

Du fait du trafic maritime et de l'éloignement des côtes, la dalle supérieure a été réalisée sans chambre de bétonnage, donc sans accès. Un béton auto-compactant a été injecté par la sous-face du coffrage, les coffrages supérieurs et inférieurs étant équipés de capteurs de pression et de témoins de remplissage ; ce dernier a ainsi été conduit sans nécessiter de vibration du béton. Les tassements différentiels d'un élément par rapport à l'autre durant la construction du joint ont été limités à 3 mm par l'application d'un surballastage au droit du joint équivalent aux charges verticales définitives.

Remblaiement et enrochements

Le tunnel est positionné dans la tranchée de telle manière que le niveau des enrochements ne soit pas supérieur au niveau du fond marin avant travaux. Les remblais sont divisés en quatre phases : stabilisation en sable, sur 2 m, effectué immédiatement après immersion, remblais global en sable (6 m supplémentaires), filtre en gravier (épaisseur 70 cm), enrochements Dn 500 mm dans le chenal de navigation et Dn 300 mm ailleurs.

La pose du sable est effectuée par le ponton multiusage, au tube plongeur et contrôlée par son volume. La pose du filtre est effectuée par le même équipement que le gravier de fondation, par tube de pose également asservi à un plan laser.

La pose des enrochements est effectuée par benne preneuse à l'aide d'une barge spécifique.

TRAVAUX DE FINITIONS ET INSTALLATIONS ÉLECTROMÉCANIQUES

Les travaux de finitions du tunnel ont commencé bien avant la dernière immersion : dès la préfabrication, une partie des installations électromécaniques a été placée dans les galeries techniques. Les travaux de finition à l'intérieur du tunnel se sont développés à partir de la pose du deuxième élément, en septembre 1997, quand l'accès a été donné à l'intérieur du premier élément de tunnel.

Réalisation du joint Oméga et de sa protection

Dès la stabilisation de l'élément à sa position finale, assurée par le département Marine, les équipes

de finitions sont entrées en action pour la réalisation du joint Oméga. Outre le premier joint caoutchouc (joint Gina), assurant à lui seul une étanchéité totale, une seconde barrière aux infiltrations est assurée par la pose par l'intérieur d'un profil en néoprène en forme de Ω sur toute la périphérie du joint d'immersion. L'étanchéité en est ensuite testée à une pression supérieure à celle de la mer. Ce joint est ensuite protégé des agressions pouvant venir de l'intérieur du tunnel (choc, incendie, produits polluants...) par une épaisseur de 50 cm de béton armé dans lequel sont ménagées des clés de cisaillement empêchant tout déplacement latéral ou tassement différentiel d'un élément par rapport à l'autre.



Photo Peter Thornvig

Une voie d'autoroute avec ses panneaux d'habillage

A motorway carriageway with its trim panels

L'échange de ballast

Un coefficient de sécurité de 1,06 doit être assuré vis-à-vis des forces de flottaison du tunnel, en prenant en compte la densité maximum de l'eau de mer.

Le premier ballastage réalisé pendant, et complété après l'immersion, par le remplissage en eau des réservoirs est progressivement échangé suivant une séquence minutieuse par un ballastage en béton de masse : 50 cm d'épaisseur moyenne sur la surface des deux voies d'autoroute, auxquels s'ajoutent les trottoirs de circulation faisant office de caniveaux à câbles le long de chacune des voies ferrées.

A ce stade sont également installés les conduits de drainage des chaussées d'autoroute en PET soudé, avec des avaloirs tous les 50 m.

Les finitions de génie civil

Après chargement du tunnel à son poids quasi définitif (béton de ballast, remblai latéral et enrochements sur la toiture), il est possible de procéder à la couche finale de réglage en béton des voies autoroutières.

Celle-ci est réalisée à l'aide d'une règle lisseuse montée sur une pelle hydraulique à bras télescopique et asservie à un niveau laser.

Ce système permet un réglage sur une grande surface avec une précision inférieure à 10 mm qui permettra d'appliquer sans préparation supplémentaire les deux couches de chaussée en enrobé (40 + 30 mm).

Des glissières de sécurité en béton (profil New Jersey) sont ensuite coulées en place le long de chacune des voies d'autoroute.



NAUFRAGE ET RENFLOUEMENT DE L'ÉLÉMENT 13

L'élément numéro 13 n'a pas porté chance aux équipes de construction du tunnel, en effet, suite à une erreur de placement du ferrailage dans une des longrines de maintien des panneaux d'about, celle-ci a cédé sous la pression de l'eau en phase finale de l'opération d'immersion, entraînant la perte de contrôle immédiate de l'élément et son naufrage.

Fort heureusement l'élément ne se trouvait qu'à 1,3 m de son niveau de fondation et à quelques mètres de sa position définitive. En conséquence, les pontons d'immersion bien que surchargés n'ont pas été noyés, et la structure béton n'a pas subi de dommage significatif, malgré un atterrissage accéléré sur sa fondation de gravier.

Parallèlement aux inspections détaillées pour conclure sur l'utilisation définitive de l'élément, une nouvelle paroi d'about a été préparée à terre, équipée de pompes. Après positionnement de la nouvelle paroi et renforcement des longrines par des équipes de plongeurs, deux jours de pompage ont été nécessaires au vidage de l'élément avant de pouvoir procéder à son inspection de détail. L'élément a ensuite été relevé de 3 m puis translaté de 300 m sur une fondation provisoire, de façon à pouvoir reprendre la fondation originale.

Au total après deux mois de travaux de renfloement, l'élément a pu être reposé à sa bonne position. Dès lors, le planning des immersions a été accéléré au rythme d'une immersion tous les 15 jours pour le reste du chantier de manière à ne pas arrêter l'usine de préfabrication des éléments.

Un tube de voie ferrée
A railway tube



Photo Peter Thornvig

L'île artificielle et l'alignement du tunnel.
Le ponton multiusage et les îles d'ancrage
The artificial island and the alignment of the tunnel.
The multi-purpose pontoon and the anchoring islands



Photo Magasinnet, Hellerup

Les installations électromécaniques

Ces installations constituent environ 10 % du coût du tunnel soit environ 400 millions de francs. Les travaux sont réalisés en sous-traitance du contrat principal par un groupement franco-danois (encadré "Les principaux intervenants"). Les travaux progressent actuellement simultanément dans les trois locaux techniques du tunnel : un à chaque extrémité et un au point central dans l'élément n° 10.

Il y a au total quatorze systèmes différents dont les plus importants sont : électricité haute et basse tension, ventilation (réalisée par accélérateurs longitudinaux placés dans des niches en toiture - Jet Fans), éclairage, pompage des eaux de drainage, défense incendie, sprinklers et mousse ignifuge, portes coupe-feu de communication entre tunnels, barrières d'arrêt d'urgence des voies d'autoroutes.

Automatisation de la surveillance et du fonctionnement du tunnel

L'ensemble du lien fixe sera géré et contrôlé par des automates programmables capables de prendre en compte un nombre de scénarios de fonctionnement possibles. En outre l'état des divers systèmes est enregistré par un réseau de capteurs et l'ensemble des informations transféré à un centre d'opération et de contrôle situé sur la rive suédoise à proximité des barrières de péages.

Les opérateurs de ce centre pourront visualiser l'ensemble de la situation sur des écrans et des synoptiques et intervenir en déclenchant des scénarios ou en activant directement les installations. En dehors du contrat principal, d'autres équipements sont mis en place dans le tunnel, ceux-ci parcourent le lien fixe d'une côte à l'autre.

Ce sont :

- ◆ les systèmes de télécommunication (téléphone, radiotéléphone, fibres optiques) ;
- ◆ le réseau de circuit interne de caméras permettant de visualiser le trafic sur l'autoroute avec indication de la vitesse du flux ;
- ◆ la signalisation modulaire et les portiques d'affichage des voies d'autoroute ;
- ◆ les systèmes d'exploitation ferroviaires aux standards danois et suédois (signalisation et communication) ;
- ◆ la détection incendie ;
- ◆ les installations de caténaire des voies ferrées.

Exécution des contrats "en parallèle"

Afin de faire face à la nécessité d'une période de tests d'intégration, d'opération simulée et à des exercices de sécurité beaucoup plus extensifs que prévus initialement, le client a décidé de faire exé-

Protection anti-feu

Le problème d'un incendie à l'intérieur du tunnel a bien entendu été étudié y compris dans le cas d'un transport d'hydrocarbure. A cet effet une couche de projection anti-feu de 26 mm d'épaisseur minimum est appliquée sur toutes les parois du tunnel en contact avec la mer (plafond et murs externes). Cette protection a été testée en laboratoire afin de garantir un échauffement de moins de 250 °C au niveau de la nappe d'armature la plus proche et une absence d'éclatement du béton, après un feu d'hydrocarbure simulé de 2 heures à plus de 1 200 °C.

La défense anti-incendie est complétée par des bouches incendie situées tous les 85 m dans chacun des tubes d'autoroute. La galerie de secours est protégée par des portes coupe-feu, elle est maintenue en légère surpression de façon à éviter l'intrusion de fumée. La galerie technique est protégée par un réseau de sprinkler.

Habillage des murs des tunnels d'autoroute

Des panneaux d'aluminium laqués de couleur claire sont placés en habillage des murs des voies d'autoroute, leur intérêt est de permettre un nettoyage facile des parois et une ambiance nette et rassurante aux futurs usagers de ce long ouvrage.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Béton : 700 000 m³
- Acier d'armatures : 60 000 t
- Remblai de tranchée en mer : 500 000 m³
- Enrochements : 500 000 m³
- Précontrainte provisoire : 2 000 t

cuter les travaux "en parallèle". Les divers intervenants sur une même partie du lien devant exécuter leur travaux simultanément.

Cette phase est maintenant en cours, nécessitant des efforts de planification et de coordination accrus pour chacun des contractants.

C'est le groupement ØTC, ayant réalisé le génie civil, qui a été chargé de la programmation et de la coordination sur le site.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Øresund Konsortiet (ØSK) : société détenue à 50 % par chacun des deux États suédois et danois

Groupement d'entreprises

Øresund Tunnel Contractors (ØTC) : groupement complètement intégré de cinq grandes entreprises internationales :

- NCC AB, Suède, mandataire du groupement, 24,1 % des parts
- Dumez GTM, France, 24,1 % des parts
- John Laing Construction Ltd., Royaume Uni, 24,1 % des parts
- Boskalis Westminster Dredging B.V., Pays Bas, 19 % des parts
- E. Pihl & Son AS, Danemark, 6,7 % des parts

Principaux sous-traitants

- Symons Travers Morgan (UK) : études d'exécution de l'ouvrage définitif
- Dumez GTM (F) : conception et études des ouvrages provisoires de l'usine de préfabrication
- SSB, groupement de Semco (DK) et Spie Enertrans (F) : installations électromécaniques
- Mandoval-Persolite (UK, DK) : flocage anti-feu
- Intekna (Italie) : panneaux d'habillage du tunnel
- Balfour Beatty (UK) : installation des voies ferrées

ABSTRACT

The immersed Øresund tunnel between Sweden and Denmark. The final phase

R. Eymery, Br. Francou, Ph. Maldiney

Officials of both countries have marked the end of the civil works phase on March 16, 1999 by an opening ceremony of the tunnel. This early completion will allow the commercial opening of the complete Oresund link on July 2000 almost six months in advance of the original schedule. This has only been possible by very high productivity in 1998 for prefabrication and immersion of the 55 000-t tunnel elements (one element every two weeks) despite difficulties and risks inherent in projects of such magnitude. A high standard of quality has always been maintained in order to ensure the required durability of 100 years and the watertightness of the concrete. The article details the numerous technical details, often innovative, that have been developed in order to master all marine works of this huge construction project. The prefabrication works were described in a previous issue of Travaux n° 732 of June 1997. A description of electro-mechanical works is also included.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Øresund-Seeunterquerung zwischen Schweden und Dänemark Die Abschlußphase

R. Eymery, Br. Francou, Ph. Maldiney

Die Eröffnungszeremonie am 16. März 1999 in Anwesenheit der Vertreter beider Länder hat den Abschluß der Tiefbauarbeiten markiert. Dank dieser vorzeitigen Fertigstellung kann die gesamte ständige Øresund-Verbindung am 1. Juli 2000 dem Verkehr übergeben werden, das wäre fast sechs Monate früher als in der ursprünglichen Planung vorgesehen. Diese Leistung ist der ausgezeichneten Effizienz während des Jahres 1998 bei der Vorfertigung und der Versenkung der 55000 Tonnen Tunnelemente (ein Element alle vierzehn Tage) zu verdanken, die trotz der solchen bedeutenden Baumaßnahmen innewohnenden Schwierigkeiten und Risiken erreicht werden konnte. Ein optimaler

Qualitätsstand wurde ständig aufrechterhalten, um die vorgeschriebene hundertjährige Lebensdauer und die Dichtigkeit des Betons zu gewährleisten. Im vorliegenden Artikel werden die zahlreichen, oftmals innovierenden technischen Einzelheiten dargelegt, die zwecks Beherrschung aller auf offener See durchgeführten Arbeiten dieser gigantischen Verwirklichung entwickelt worden sind. Die Vorfertigungsarbeiten sind detaillierter in einer früheren Travaux-Ausgabe (Nr. 732, Juni 1997) beschrieben worden. Eine Beschreibung der elektromechanischen Arbeiten wird folgen.

RESUMEN ESPAÑOL

El túnel sumergido del franqueo del Øresund entre Suecia y Dinamarca La fase de finalización

R. Eymery, Br. Francou y Ph. Maldiney

La ceremonia de inauguración el 16 de marzo de 1999 en presencia de los representantes de los dos países ha señalado el término de las obras de ingeniería civil. Esta entrega, antes de los plazos determinados, permitirá la inauguración comercial del conjunto del enlace fijo del Oresund el primero de julio del año 2000, o sea con casi seis meses de anticipo con respecto al programa inicial. Este avance ha sido posible debido al gran rendimiento obtenido en 1998 en la prefabricación y en la inmersión de las 55 000 toneladas de elementos del túnel (un elemento cada quince días) a pesar de las dificultades y riesgos derivados de las obras de semejante envergadura. Un nivel de calidad óptima fue mantenido en permanencia para garantizar la longevidad impuesta de 100 años y la impermeabilidad del hormigón. Se precisan en este artículo los numerosos detalles técnicos, frecuentemente innovadores, que se han desarrollado con objeto de dominar todos los trabajos en medio marítimo de estas gigantescas obras. Las operaciones de prefabricación se han descrito con mayor detalle en un número anterior de Travaux (n° 732 de junio 1997). También figura una descripción de los trabajos electromecánicos.

Métro du Caire

Extension de la ligne 2 et du Nil

L'extension de la ligne du métro du Caire est un bon exemple d'organisation et de préparation réussie d'un grand contrat de conception-construction à l'international.

Les incidences des travaux sur l'environnement urbain ainsi que la traversée sous fluviale du Nil ont été maîtrisées grâce à des analyses de risque appropriées.

Tel un leitmotiv, l'esthétique des stations de la seconde ligne de métro est déclinée sur le rôle que joue cette ligne en tant que lien culturel entre la Haute et la Basse Egypte (photo 1). Ce rapprochement historique date de la première dynastie et depuis lors il ne fut jamais remis en cause. Il est l'essence même de l'Egypte moderne. Le Nil, à n'en point douter, a été le catalyseur de cette unification. Sa crue estivale source de fertilité et d'abondance a nourri tout un peuple pendant des millénaires. L'ancienne Egypte vénérait le Nil, elle en implorait la générosité, et ce culte est resté à jamais gravé dans la mémoire d'un peuple.

On comprend alors toute la passion qu'ont eu les Egyptiens pour la construction de la phase 2 de la ligne 2 du métro du Caire. Cette dernière comprenait le premier franchissement sous fluvial du fleuve divin.

L'inauguration de la phase 2A en avril de cette année, quelque huit mois en avance sur le programme contractuel, est venue sans doute ternir l'image pionnière de l'opération. Il n'en reste pas moins que cette prolongation de la ligne 2 donnera un nouveau souffle au centre de cette mégalopole dont la densité de population et le parc de véhicules ne cessent de s'accroître.

■ CONTEXTE DE L'OBTENTION DES AVENANTS AU CONTRAT PRINCIPAL

Le chantier de la phase 1 de la ligne 2 du métro était plus qu'à mi-parcours en 1995. La progression était satisfaisante et les délais – inquiétants au départ – étaient en passe d'être respectés. La phase 1A fut livrée à l'heure en juin 1996. Satisfait, le client avait d'autre part à cœur de mettre la totalité de cette ligne en service au plus tôt. Ce n'était pas un vœu pieux. C'était devenu une nécessité pour désengorger la cité. L'avant-projet de la partie souterraine de l'extension, réalisé par Sysstra, était en cours de finalisation. L'Egypte voyait poindre le renouveau économique qu'on lui connaît aujourd'hui et à l'instar du contrat principal, un financement intégralement égyptien pouvait être mis en place. Tous les ingrédients étaient ainsi réunis pour que le groupement d'entreprises piloté par Interinfra entame des négociations avec les autorités égyptiennes ; celles-ci débouchèrent sur la signature d'un avenant au contrat principal le 8 octobre 1995 pour une mise en vigueur le même mois. Le montant de ce premier avenant était de 1,3 milliards de francs pour la part génie civil et de 1,9 milliards de francs avec les lots électromécanique et signalétique.

Le second avenant relatif à la construction de l'extrémité sud de la ligne (phase 2B) fut signé en octobre 1997. Il correspond à une section aérienne dont la construction devait être initialement attribuée, après procédure d'appel d'offres local, à des entreprises de génie civil égyptiennes. La coordination intercatégorielle assurée par le groupement fut un élément déterminant dans le choix du client de nous confier la construction de cette phase supplémentaire. D'un montant de 250 millions de francs pour la part génie civil, le montant total incluant les lots électromécanique et signalétique avoisine 600 millions de francs.

La joint-venture en charge de la réalisation du génie civil réunit autour du mandataire Campenon Bernard SGE, les entreprises Dumez GTM et GTMI, Spie Batignolles TP, Bouygues, DTP, Eiffage et l'entreprise égyptienne Arab Contractors.

■ PRÉSENTATION DU PROJET

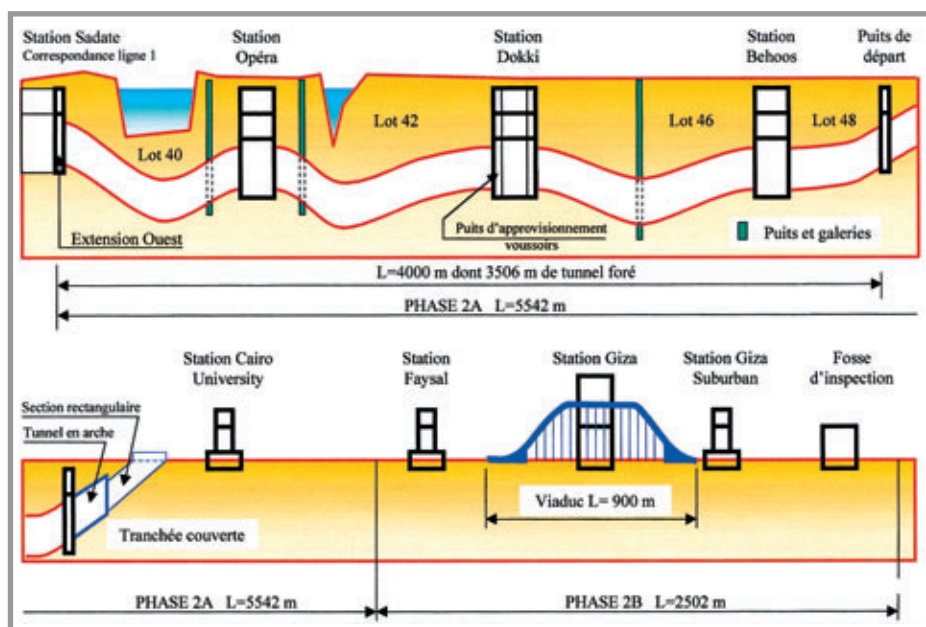
Avec ses 18 km de longueur, la ligne 2 (figure 1) relie du nord au sud le quartier rive droite de Shubra El Kheima au district de Giza situé sur la rive



Figure 1
La ligne 2
du métro du Caire

Line 2
of the Cairo metro

Figure 2
Phase 2 (A + B). Profil longitudinal
Phase 2 (A + B). Longitudinal profile



traversée sous fluviale

Joël Petit
PROJECT MANAGER
Campenon Bernard SGE

Alain Roussin
DESIGN MANAGER
Spie Batignolles TP

Patrick Ramond
DEPUTY TBM MANAGER
Campenon Bernard SGE

gauche du Nil. Dans le centre-ville du Caire, deux stations, Mubarak et Sadate permettent la correspondance avec la première ligne, elles avaient été partiellement construites par le même groupement dans les années quatre-vingt. La ligne 2 comporte 18 stations, 12 d'entre elles étant souterraines. Les phases 1A et 1B ont été mises en service respectivement en octobre 1996 et septembre 1997. La phase 2A (figure 2) s'étend sur 5,5 km de la station Sadate, située au centre névralgique de la ville à la station Cairo University. Outre les traversées sous fluviales des deux bras du Nil (photo 2) enveloppant l'île de Gezira, cette section comprend la réalisation de :

- ◆ 3 stations souterraines, Opéra, Dokki et Behoos ;
- ◆ la station aérienne de Cairo University couvrant un canal ;
- ◆ l'ouvrage de raccordement à la station Sadate intégrant le puits d'extraction du tunnelier ;
- ◆ un puits de montage du tunnelier ;
- ◆ trois puits de ventilation et d'exhaure ;
- ◆ 3506 m de tunnel foré réalisés à l'aide d'un tunnelier ;
- ◆ 437 m de tranchée couverte ;
- ◆ 900 m de voies construites à proximité d'un canal d'irrigation et nécessitant donc un soutènement des berges ;
- ◆ cinq postes de transformation, intégrés pour deux d'entre eux à des stations souterraines.

Le délai contractuel de réalisation était de 49 mois plus 1 mois de période d'essai. L'ouvrage fut mis en service en avril 1999 soit 42 mois après la date de mise en vigueur.

La phase 2B avec ses 2,5 km de longueur, prolonge par le sud la phase 2 A jusqu'au terminus de la ligne. Elle comporte la réalisation (en cours) de :

- ◆ trois stations aériennes, dont une construite au-dessus de voies de chemin de fer en exploitation ;
- ◆ 900 m de viaduc construits en surplomb de la ligne de chemin de fer ;
- ◆ un atelier d'entretien et deux postes de transformation.

Pour cette phase, les délais sont de 36 mois auxquels il faut ajouter une période de test de deux mois. L'ouverture au public est prévue le 1^{er} janvier 2001.

■ LE LANCEMENT DU PROJET

Les premiers coups de benne de parois moulées ont été donnés seulement six semaines après la date de mise en vigueur de l'avenant, le temps



Photo 1
Revêtements muraux de la station Opéra. Les thèmes esthétiques retenus déclinent tour à tour l'histoire de l'ancienne Egypte et l'histoire moderne du pays

Wall linings in Opéra station. The aesthetic themes adopted review one by one the history of ancient Egypt as well as the country's recent past



Photo 2
Vue générale du Nil, du pont Kasr El Nile et de la rive droite

General view of the Nile from the Kasr El Nile bridge and the right bank

d'obtenir les premières approbations relatives au puits de montage du tunnelier. L'hydrofraise entra en action sur la station Behoos dix semaines après signature, le temps de l'importer et de la monter. Les effectifs de la direction technique avaient été mobilisés par anticipation de la signature du contrat. La campagne géotechnique avait été lancée également quelques semaines auparavant. Le rythme était donné, encore fallait-il le pérenniser !

L'expérience récente acquise sur la phase 1 établit qu'il était impératif de mettre en adéquation le planning des travaux spéciaux au rythme du tunnelier, et non l'inverse comme si souvent vécu sur la phase précédente. C'était la clé du succès et une vraie gageure compte tenu des performances du tunnelier sur la phase 1. A de rares exceptions près, le défi fut relevé grâce à un véritable dialogue entre les différents acteurs et partenaires.

Avec Solétanche Bachy, à qui les travaux spéciaux avaient été dévolus dans le cadre d'une cotraitance, nous avons mis sur pied un plan d'action dont l'essentiel visait à favoriser la prompte réalisation

Figure 3
Profil en long géologique
Geological longitudinal profile

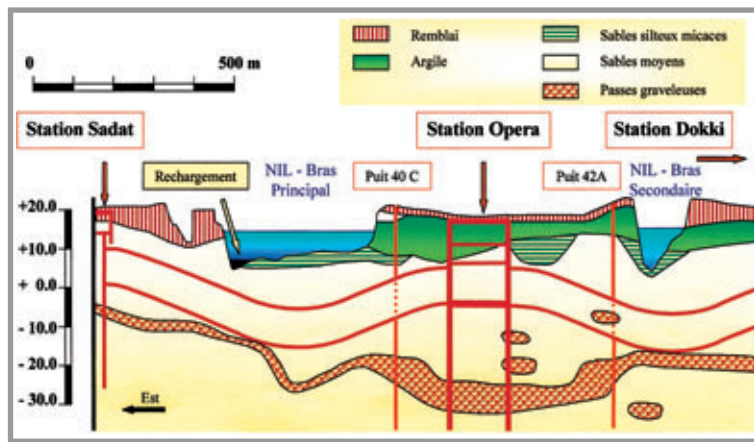


Figure 4
Déroutement des travaux de la partie souterraine
Worked phases on the underground part

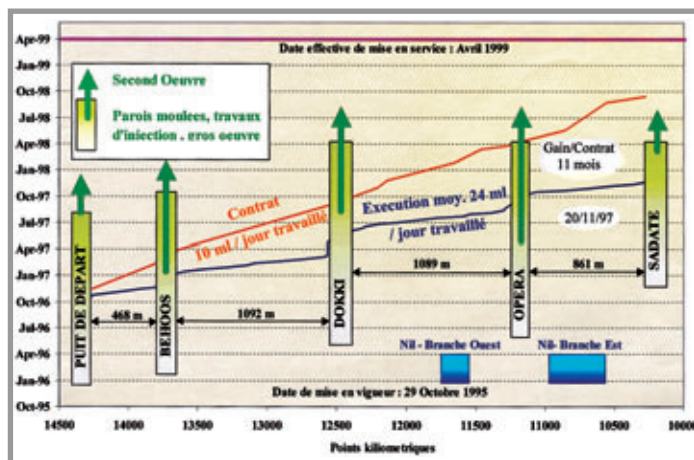
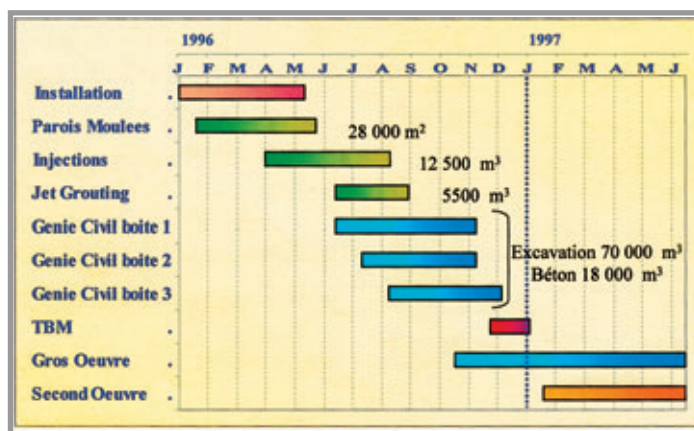


Figure 5
Planning d'exécution du génie civil de la station Behoos
Civil engineering planning for the Behoos station



de leurs travaux situés sur le chemin critique du chantier. Il ne s'agissait aucunement de confondre rapidité et précipitation, la conception des ouvrages en question devait être "sécuritaire" et leur exécution strictement contrôlée puis validée. En ce qui concerne les traitements de terrain, la règle retenue fut de séparer de façon systématique les fonctions mécaniques et hydrauliques et d'avoir recours à des techniques d'injection et de *jet grouting* déjà éprouvées sur les sols du Caire. Des moyens importants ont été mobilisés pour respecter les dates au plus tôt d'un planning objectif très ambitieux. Des zones tampon furent prévues pour occuper un matériel qui pouvait devenir pléthorique si jamais les emprises de chantier n'étaient pas libérées aux dates projetées.

Parmi les actions contribuant à réduire la durée des tâches situées sur le chemin critique, Solétanche Bachy a pris l'initiative pour le traitement des radiers injectés, de mettre en œuvre des quantités de gel de silice légèrement supérieures à celles préalablement établies.

Le but était d'obtenir dès le premier test de pompage l'assurance d'un coefficient "contractuel" de perméabilité globale de 10^{-6} m/s et donc de supprimer le recours ultérieur à des reprises d'injection. Ce fut payant en terme d'efficacité, moins en terme de recette car le client ne s'est pas privé d'appliquer certaines réfections sur des quantités qualifiées de "surabondantes".

Le client, de son côté, a respecté au mieux ses engagements en matière de déviations de réseaux et de libération d'emprises; le groupement l'a guidé pour le phasage de ces travaux. Certains des sites, comme celui de la station Opéra, ont été libérés en avance sur les dates contractuelles. Nous avons pressenti les difficultés du client à exproprier certains des terrains où les résurgences et les ouvrages en surface d'alimentation électrique devaient être construits. Il y avait là un risque de remise en cause tardive de l'implantation des puits dont les travaux étaient sur le chemin critique. Après une étude de faisabilité effectuée en collaboration avec nos partenaires électromécaniciens, nous avons proposé d'enterrer ces ouvrages. Deux stations de redressement ont été finalement adjointes à des stations souterraines et les deux puits d'alimentation correspondants et leurs rameaux de raccordement au tunnel ont été supprimés, deux autres puits de ventilation ont été également déplacés. Les rameaux, exécutés par des moyens traditionnels de creusement sous des charges d'eau atteignant une trentaine de mètres sont des ouvrages toujours extrêmement délicats à réaliser, leur suppression ne pouvait que servir favorablement le planning.

■ L'EXÉCUTION

Les stations

Trois stations enterrées ainsi qu'une station aérienne ont été réalisées dans le cadre de la phase 2A. De 150 m de longueur et généralement de 22 m de largeur, une station enterrée comporte trois niveaux: le hall billetterie, la plate-forme technique et les quais.

Elle est construite à l'abri d'une enceinte de parois moulées de 1,2 m d'épaisseur et de 50 m de profondeur. La nappe phréatique, alimentée par le Nil, se situe 3 à 4 m sous le niveau de terrain naturel. La coupe géologique présentée (figure 3) pour la station Opéra est représentative des conditions rencontrées sur les autres sites: on y distingue sur les dix premiers mètres des matériaux de rem-

blais et des argiles, les horizons sous-jacents sont des sables, silteux en tête, devenant plus grossiers et denses en profondeur. Faute de substratum imperméable, l'étanchéité pendant les terrassements est assurée par un radier injecté de 7 m d'épaisseur, successivement prétraité par un coulis de bentonite ciment et injecté par un gel de silice "mou". Deux écrans en béton plastique cloisonnent la station en trois boîtes. La perméabilité globale requise est de 10^{-6} m/s, elle est validée, après traitement, par un essai de pompage sur chacune des boîtes. Le terrassement est ensuite réalisé en taube sous la dalle de couverture. Pour atteindre le fond de fouille situé 22 m sous le terrain naturel, la dalle technique est exécutée en descendant dans le but de servir d'appui aux parois moulées en sus de deux niveaux de butons temporaires. Lorsque le radier est bétonné et le butonnage provisoire déposé, le tunnelier peut enfin déboucher et être transféré pour continuer sa course. Après cette opération, les quais, poteaux intermédiaires et dalle billetterie sont réalisés pour laisser place au second œuvre.

La construction s'est déroulée dans de bonnes conditions, les seules difficultés rencontrées ont été associées à des venues d'eau en fin de terrassement. Deux renards attribués à un collage défectueux de l'interface paroi-radier injecté d'une part, et à l'érosion régressive du bouchon d'injection d'autre part, se sont déclarés successivement sur les stations Dokki et Opéra. Dans les deux cas la situation fut rapidement maîtrisée par un remblai de sacs de sables protégé par une carapace en béton dans lequel le débit de fuite était canalisé et pompé. Très rapidement baptisé Mastaba – Egypte oblige – ce bloc a permis de poursuivre l'exécution des radiers, le temps de traiter les défauts. Curieusement, pour les deux cas le débit de fuite s'est un jour considérablement réduit sans qu'il y ait eu de relation de cause à effet évidente avec les travaux d'injections menés. L'exécution des radiers fut alors achevée. Seul l'événement de Dokki a retardé de six semaines l'avancement du tunnelier.

La figure 4 décrivant l'avancement du tunnelier donne une idée du planning général d'exécution des ouvrages enterrés. On peut constater que les travaux de génie civil ont été menés sur plusieurs fronts à la fois. Le chantier fut doté très rapidement de moyens importants rendus disponibles par l'achèvement de la phase 1. Pour fixer les ordres de grandeur, la figure 5 retrace l'exécution de la station Behoos et précise les quantités mises en œuvre pour une station.

Break in/Break out

Sur la phase 2A, huit bouchons assurant à la fois un rôle de consolidation et d'étanchéité étaient nécessaires de part et d'autre des stations, pour les

débouchés du tunnelier (break out) et rentrées dans le terrain (break in). Le principe retenu et mis au point à force d'expériences quelque fois douloureuses sur la phase précédente est schématisé par la figure 6. Le concept est basé sur la séparation des fonctions mécanique garantie par le traitement de *jet grouting* et d'étanchéité assurée par un écran au coulis et un fond injecté de gel dur de silicate. Un espace non-traité entre le fond injecté et le bloc de *jet grouting* permet d'avoir recours à un rabattement éventuel par pompage dans ce volume.

Le contrôle de perméabilité est effectué à l'achèvement des écrans périphériques et du fond injecté par essai de pompage, à la suite de quoi le traitement de consolidation est réalisé. Des drains subhorizontaux sont forés depuis l'intérieur de la station, avant démolition de la paroi du tympan, afin de détecter d'éventuelles arrivées d'eau intempestives et procéder si besoin à des injections complémentaires.

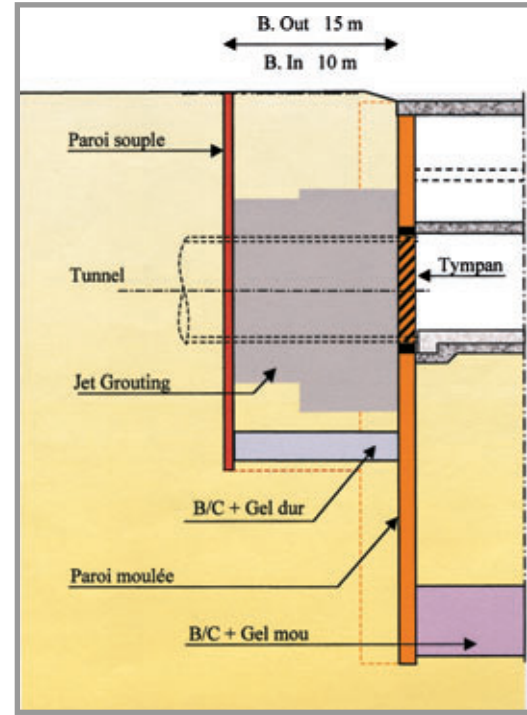


Figure 6
Schéma type
des break in et break out
Typical break-in
and break-out diagram

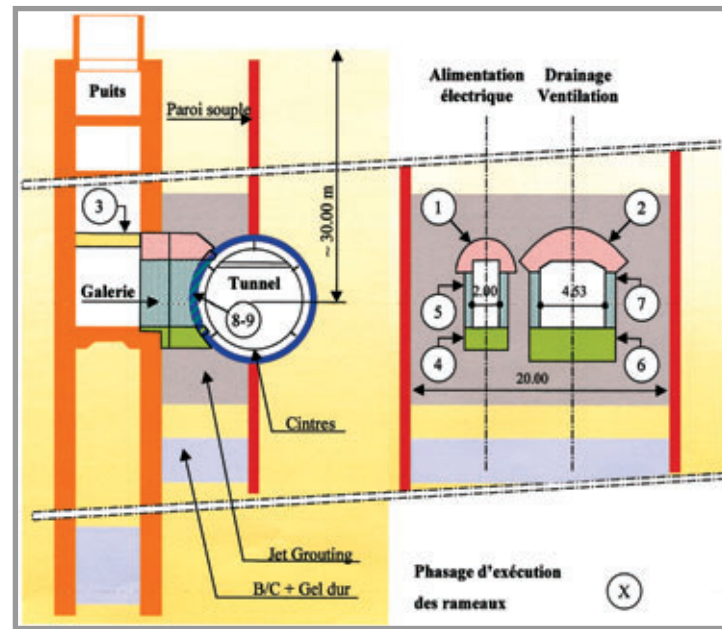


Figure 7
Rameaux :
confortement des terrains.
Phasage
de construction
Branches :
ground reinforcement.
Construction phasing

Les ouvrages annexes et rameaux

Quatre rameaux associés à trois puits annexes ont été finalement construits sur la phase 2A. La géométrie et le principe d'exécution de ces ouvrages sont décrits figure 7. L'enceinte des puits est réalisée en parois moulées dont les profondeurs ont pu atteindre 58 m. Une telle profondeur ne permet pas néanmoins d'équilibrer la sous-pression hydrostatique sous le bouchon par le poids des terres après excavation. C'est un radier injecté de gel de silicate "dur" qui a été réalisé afin de mobiliser un frottement significatif le long de la paroi. Le concept de traitement de terrain retenu pour rendre exécutable le creusement des rameaux par des méthodes traditionnelles relève d'un principe similaire à celui évoqué pour les break in et break out.

Photo 3
Lot 42A. Cintres temporaires
en tunnel pendant l'exécution
des rameaux

Section 42A. Temporary arches
in tunnel during the execution
of the branches



Photo 4
L'immeuble situé
au 144 rue Tahrir accusait
une forte inclinaison
avant les travaux

The building located
at 144 Rue Tahrir
exhibited a strong inclination
before the works



LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Phase 2A

- Longueur 5 542 m dont 3 506 m de tunnel foré et 437 m de tranchée couverte
- Trois stations souterraines, une station aérienne, un raccordement à station existante
- Délai d'exécution : 49 mois

Quantités

- Excavation : 535 000 m³
- Béton : 275 000 m³
- Armatures : 26 000 t
- Parois moulées : 127 000 m²

Phase 2B

- Longueur 2 502 m dont 900 m de viaduc
- Trois stations aériennes, un atelier d'entretien
- Délai d'exécution : 36 mois

Montant des avenants au contrat Interinfra

- Phase 2A : 1, 9 milliards de francs
- Phase 2B : 600 millions de francs

Montant de la part génie civil

- Phase 2A : 1, 3 milliards de francs
- Phase 2B : 250 millions de francs

Capacité de transport de la ligne 2

35 000 passagers/heure

L'exécution des rameaux de la phase 2A s'est déroulée dans des conditions globalement très satisfaisantes.

Le tunnel

Des deux tunneliers Herrenknecht à pression de boue bentonitique en activité sur la phase 1 de la ligne 2, seul celui surnommé Nefertiti a poursuivi sa course dans les terrains du Caire en forant les 3,5 km de tunnel de la phase 2A.

Le tunnel a été foré en quatre tronçons successifs depuis un puits de montage situé en aval de la station Behoos vers la station Sadate, en centre-ville. Il s'agit d'un tube circulaire dont les caractéristiques sont :

- ◆ diamètre intérieur : 8,35 m ;
- ◆ diamètre de creusement : 9,44 m ;
- ◆ revêtement définitif : anneau universel constitué de sept voussoirs préfabriqués plus une clé de 40 cm d'épaisseur et 1,50 m de largeur.

La couverture du tunnel varie entre 8,60 m au démarrage et 28 m sur l'une des berges du Nil. La figure 3 est représentative des horizons géologiques interceptés sur le parcours. Le remplissage du vide annulaire est réalisé en continu à partir de pipes d'injections situées dans l'épaisseur de la jupe. L'injection de blocage est assurée par un mortier semi-inerte (fumée de silice). Le tunnelier est guidé par le système CAP.

Pour plus de précisions sur les caractéristiques du bouclier, le traitement du marinage et la centrale de traitement de boue, le lecteur pourra se reporter à l'article "Métro du Caire. La construction de la ligne 2" paru dans *Travaux* (pages 18 à 25) en décembre 1995. Le tunnelier et la centrale de traitement ont fait l'objet d'adaptations en prévision de la traversée sous fluviale. Les modifications apportées sont décrites plus avant.

Déroulement des travaux de creusement

La durée totale du forage a été de 13 mois, soit 270 m par mois en intégrant les traversées de stations et l'attente obligée du tunnelier dans le break-out de la station Dokki. En fait la progression moyenne a été de 500 ml par mois soit encore 24 ml par jour travaillé. Les meilleures performances ont été établies lors des franchissements du Nil. Le graphique d'avancement (figure 4) met en évidence un gain, en fin de parcours, de 11 mois sur le planning contractuel.

A l'exception des traversées sous fluviales, le travail était exécuté à deux postes de 12 heures, cinq jours par semaine.

Les tassements de surface étaient en général inférieurs à 10 mm et ont atteint 18 mm au maximum au passage d'un ancien canal sur le tronçon Behoos-Dokki. Aucun fontis n'a été observé.



Après le passage du tunnelier et préalablement à toute opération de creusement des rameaux, des cintres temporaires étaient installés en tunnel (photo 3). Des drains de contrôles étaient forés depuis le puits et en cas de doute depuis le tunnel afin de vérifier l'étanchéité du traitement et de ses interfaces. Le phasage de creusement du rameau est décrit figure 7. On notera qu'un blindage par cintres légers et tôles Gescoriak était disponible, prêt pour sa mise en place en cas de déboires. La démolition du revêtement du tunnel et le bétonnage des corbeaux d'appui venaient clore l'exécution, à la suite de quoi les cintres en tunnel étaient déposés.

Dix semaines étaient nécessaires pour mener à bien les travaux d'un rameau simple et quatorze pour des rameaux doubles.

Maîtrise des problèmes liés au site

Le tracé de la phase 2A franchit à plusieurs reprises des ouvrages en exploitation, deux tranchées couvertes fondées sur parois moulées et un viaduc urbain fondé sur pieux. A chaque fois les zones concernées ont été traversées en dehors des heures d'affluence. D'autres points singuliers ont été rencontrés. On citera pour l'anecdote deux immeubles.

L'immeuble du 144, rue Tahrir

Cet immeuble d'habitations de dix étages est situé à une vingtaine de mètres du tunnel. Sa singularité est de présenter, comme le met en évidence la photo 4, une inclinaison supérieure à 1,00 m. Aucun document d'exécution n'était bien sûr disponible pour cet immeuble construit il y a une quarantaine d'années. Après deux sondages de reconnaissance des sols, des investigations sur les fondations, des mesures géophysiques et de multiples expertises, nous avons obtenu l'assurance que l'immeuble était fondé sur pieux. Il a été d'autre part diagnostiqué que la fondation était insuffisamment et incorrectement dimensionnée. Les pieux étaient sans doute cisailés. Il était impensable de ne rien faire. Un écran de protection constitué de deux files de micropieux injectés a donc été réalisé à trois mètres de distance de l'immeuble. Les micropieux ancrés à une vingtaine de mètres étaient reliés en tête par une longrine. L'objet de cet écran était essentiellement de protéger l'immeuble d'un fontis inopportun. Les tassements constatés après creusement ont ainsi été limités à 4 mm.

Le musée Mokhtar

Ce bâtiment fondé sur pieux a l'originalité d'être à la fois situé sur le tracé du tunnel et d'abriter une importante collection des œuvres du sculpteur égyptien le plus célèbre de ce siècle : Mahmoud Mokhtar. Moins de quatre mètres séparaient la pointe des pieux de la clé de voûte du tunnel. Après avoir examiné les risques encourus lors du creusement, les autorités du ministère de la Culture ont finalement décidé d'évacuer temporairement les statuettes. Elles ont par ailleurs estimé qu'il était préférable de laisser en place les sculptures de plus grande dimension après les avoir consciencieusement protégées plutôt que de procéder à un déménagement qui pouvait leur être préjudiciable.

■ TRAVERSÉE SOUS FLUVIALE

Description du site

Au droit du tracé de la ligne 2, le Nil est divisé en deux bras contournant l'île de Gezira (figure 8). Le bras secondaire ouest est large de 120 m aux

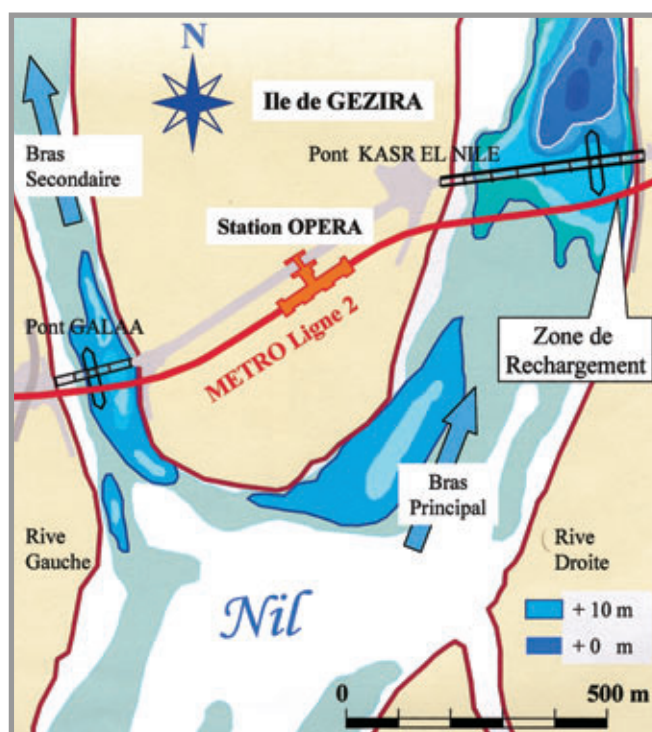


Figure 8
Traversée sous fluviale
du Nil.
Plan de situation
Crossing the Nile River.
Location

abords immédiats du pont Galaa. Le bras principal, situé en rive droite de l'île, est franchi 50 m en amont du pont Kasr El Nile, sa largeur est de 370 m. L'ouvrage est creusé dans des sables légèrement silteux et graveleux, sous une charge d'eau, en clé de voûte du tunnel, allant de 14 à 21 m. La hauteur des terrains de couverture varie entre 5,5 m (sans compter le rechargement local) et 13 m pour la branche principale. Pour la branche secondaire, les concepteurs ont pu respecter la règle d'une couverture minimale d'un diamètre (9,4 m). L'approfondissement du profil en long était limité par la pente maximale des voies (4 %) et par la présence des stations Sadate sur la rive droite et Opéra desservant l'île.

Aspects hydrauliques

L'écoulement du Nil s'effectue dans Le Caire dans un lit endigué. A proximité du site de la traversée, les fonds présentent des formes très mouvementées dont les raisons essentielles sont attribuées aux phénomènes suivants :

- ◆ les sédiments constitutifs du fond du lit du fleuve sont silto-sableux. L'absence d'éléments colloïdaux prive ces terrains de toute cohésion et les rend très facilement érodables ;
- ◆ la présence de l'île de Gezira sur laquelle vient buter l'écoulement, induit sur le bras principal un affouillement important au sud-est de l'île. L'écoulement est alors rejeté en rive droite et affouille le fond du lit en aval du site de la traversée ;
- ◆ les piles de pont et protections de piles conduisent à un rétrécissement de la section de passage, elles sont à l'origine d'affouillements importants en aval des ponts. Il est peu vraisemblable que ces affouillements puissent apporter des modifications sensibles aux systèmes de courant s'établissant en aval des ponts. Il est à noter qu'une crue exceptionnelle du fleuve pourrait cependant donner naissance à des affouillements locaux en amont des piles, au droit du tunnel.

Depuis la mise en service du haut barrage d'As-

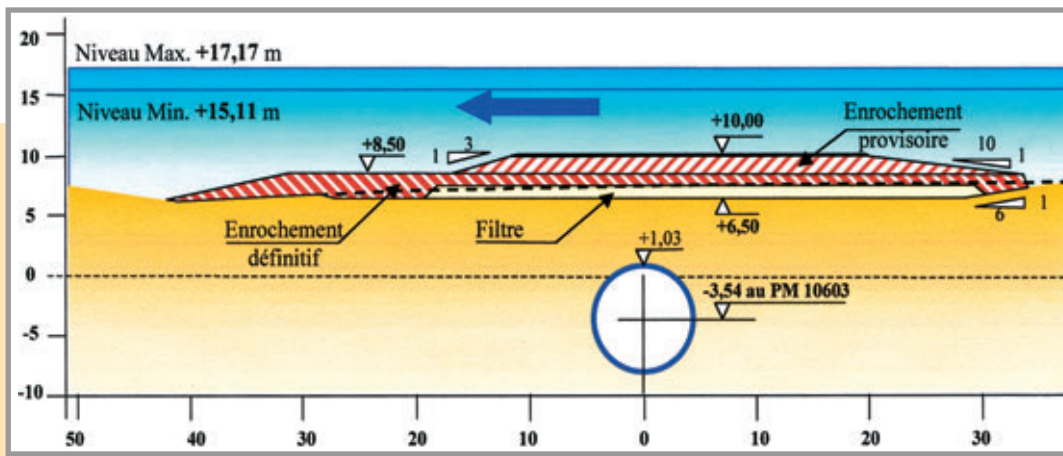
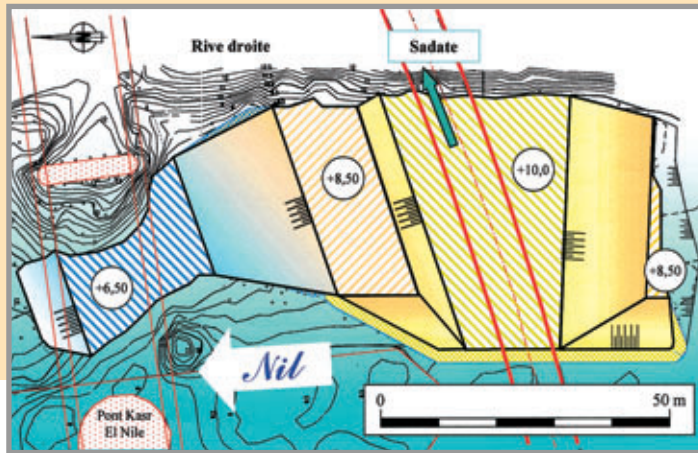


Figure 9
Profil nord-sud du rechargement
North-south profile of build-up

Figure 10
Vue en plan de la protection
Plan view of protection



sovan, il y a une trentaine d'années, les crues du fleuve sont régulées et les débits maximaux du Nil au niveau de la traversée sont de l'ordre de 2000 m³/s. Ils sont à mettre en parallèle avec un débit de 2800 m³/s (240 Mm³/jour) à Assouan. La vitesse moyenne correspondante, mesurée dans le bras principal, est de 0,7 m/s.

Les études hydrauliques menées par le "Nile Research Institute" au stade de l'avant-projet, indiquaient que la vitesse moyenne n'excéderait pas 1,8 m/s pour un débit contractuel très exceptionnel de 7000 m³/s, censé simuler un lâcher de barrage de 605 Mm³/jour à Assouan. Ces études ont conclu à l'éventualité d'un affouillement de 3 m. C'est cette dernière valeur qui fut retenue pour le calcul de stabilité du tunnel.

Bathymétrie au droit de la traversée

Pour compléter et confirmer la bathymétrie présentée dans les documents d'avant-projet, le groupement procéda à différents relevés en vue de reconnaître précisément les affouillements sous les ponts et la dépression au pied de la rive droite du bras principal. Il assura également un contrôle régulier de la bathymétrie, avant, pendant et après les travaux de rechargement et de creusement du tunnel. Le matériel utilisé était un sonar. L'analyse comparative de ces différentes campagnes a

montré que les fonds au droit du tunnel pouvaient accuser des variations de l'ordre du mètre, en fonction des années et des saisons.

Géologie du site (figure 3)

Une campagne géotechnique complémentaire, menée au stade des études d'exécution avait pour objet de compléter les investigations préliminaires d'avant-projet. Elle avait en outre pour but de quantifier les divers paramètres de cisaillement et de déformabilité pris en compte dans les études d'interaction sol-structure et de stabilité de front de taille. Le programme comprenait un certain nombre de sondages et d'essais SPT, dilatométriques DMT, et de pénétration statique CPT, répartis sur le tracé. Les sondages ont reconnu les terrains jusqu'à une dizaine de mètres sous le radier du tunnel. Dans l'ensemble, sous les deux premiers mètres de sédiments silto-sableux, peu consolidés, les terrains sont constitués de sables moyens légèrement silteux et graveleux. Leur densité relative, caractérisée au moyen de l'indice corrigé N du SPT augmente quasi linéairement avec la profondeur. Au niveau du tunnel, les terrains présentent une bonne densité avec un N moy = 40. Localement, on rencontre des lits silto-argileux peu épais (10 à 30 cm) ainsi que des passages plus graveleux de 1 à 3 m d'épaisseur situés sous le radier du tunnel. Le niveau de la nappe est directement lié au niveau du Nil et à ses variations saisonnières.

Les essais de pénétration dynamique de type SPT ont été utilisés pour évaluer la valeur des contraintes de cisaillement provoquant la liquéfaction et diagnostiquer si les couches sus-jacentes saturées, étaient liquéfiables sous séisme. Ceux-ci ont fait apparaître une sécurité suffisante vis-à-vis de ce phénomène pour le niveau de séisme pris en compte.

Stabilité de l'ouvrage

L'étude de stabilité de l'ouvrage a démontré qu'une couverture minimale de 9 m en phase travaux et 7,5 m en phase d'exploitation était requise pour assurer à l'ouvrage un coefficient de sécurité à la flottabilité de 1,5. En conséquence de quoi, sur la base de la bathymétrie avant travaux, un rechargement local du lit du bras principal était nécessaire.

Ainsi, la stabilité de l'ouvrage pouvait être également justifiée dans l'hypothèse "contractuelle" d'une érosion du lit de 3 m (4,50 m de couverture en phase d'exploitation). En fait, il faudrait envisager une hauteur de couverture réduite à 3 m environ pour que la résistance des terrains soit mobilisée et que l'ouvrage commence réellement à se déformer.

Les calculs d'interaction sol-structure conduits pour le dimensionnement du revêtement du tunnel ont

montré que les sollicitations demeurent faibles, quelles que soient les phases de construction, de remblai, de déblai et d'affouillement, qui ont été tour à tour considérées. En effet, l'anneau subit un effort de précontrainte important, tant la charge hydrostatique est prépondérante. La variabilité des caractéristiques de sol a été prise en compte également dans les calculs. Il a été vérifié que les sollicitations dans l'anneau restaient admissibles lorsque les caractéristiques de cisaillement étaient dégradées et les modules de déformation des terrains réduits au deux tiers de la valeur fixée par le géotechnicien.

Enfin, les conditions de stabilité de front de taille ont été examinées pour les deux cas de soutènement par pression de fluide bentonitique et par air comprimé en simulation d'une intervention hyperbare.

Afin de réduire le risque d'évolution de fontis lié à la rencontre d'une zone non consolidée, avec présence éventuelle d'éléments grossiers, la surpression de consigne fut limitée à 4 kPa.

Le rechargement

Le rechargement local mis en œuvre au pied de la rive droite du bras principal a pour objet :

- ◆ d'assurer une couverture suffisante de l'ordre d'un diamètre lors des opérations de creusement ;
- ◆ de protéger l'ouvrage des risques d'affouillement durant la période d'exploitation.

Cette protection pour être pérenne devait résister aux vitesses d'écoulement, éviter l'aspiration des sables du lit à travers elle, ne pas générer des courants qui provoqueraient de nouveaux affouillements, en particulier à proximité de la protection.

Les figures 9 et 10 décrivent le rechargement. Les enrochements sont inscrits dans un fuseau 30-250 mm, avec un $D_{50} = 100$ mm. Ils sont dimensionnés pour une vitesse d'écoulement de 2 m/s. Une couche de gravier 3-10 mm assure le rôle de filtre entre les sables du lit et les enrochements. Pendant la phase temporaire de remblai à la cote +10,00 m (nécessaire au creusement du tunnel), la protection était complétée par une couverture de sacs de sables censée diminuer la rugosité de la protection. La couche supérieure fut retirée après exécution des bétons de radier, le niveau final de protection est aujourd'hui à la cote +8,50 m, ménageant ainsi une couverture minimale de 7,5 m au tunnel.

Le remblai a été posé sur le fond sous 5 à 10 m d'eau et par des vitesses de courant de l'ordre de 0,5 m/s (photo 5). Lors des travaux, la zone à remblayer fut divisée en rectangles élémentaires pour le contrôle de positionnement de la barge, la mise en place des remblais et les contrôles des niveaux intermédiaires. Les opérations ont débuté par un léger dragage de nettoyage.



Photo 5
Travaux fluviaux
de rechargement
River build-up works

Analyse de risque

Une analyse de risque a été entreprise par le consultant afin d'identifier les risques potentiels liés à la construction du tunnel et les événements pouvant affecter en situation d'exploitation, le bon fonctionnement du métro. Quatre catégories de risques ont été recensées :

- ◆ les erreurs de conception :
 - stabilité du tunnel et de son revêtement,
 - conception parasismique,
 - liquéfaction des sables,
 - étanchéité du revêtement,
 - représentativité des reconnaissances géotechniques ;
- ◆ les risques liés à la construction :
 - perte de stabilité de front,
 - aléas géologiques, boulders...
 - perte d'étanchéité au joint d'articulation de la jupe, ou au joint de queue,
 - détérioration des outils d'abattage,
 - incendie ;
- ◆ les événements "internes", pendant la phase d'exploitation :
 - accident d'exploitation,
 - collision de trains,
 - corrosion des armatures,
 - incendie ;
- ◆ les événements "externes", pendant la phase d'exploitation :
 - constructions sur les berges à proximité du tunnel,
 - accidents de trafic fluvial,
 - affouillements du lit du fleuve,
 - tremblement de terre d'intensité exceptionnelle,
 - dégradation de la protection.

Ces risques ont ensuite été appréciés et subjectivement quantifiés en fonction de leur degré d'impact sur le projet et de la probabilité que l'événement se produise.

Force est de constater que cette démarche dont les Anglo-Saxons sont si friands nous a permis de

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

- Ministry of Transports (État égyptien)
- National authority for tunnels

Consultant

GCMC, joint-venture, composée de :

- Parsons Brinckerhoff International Inc.
- Electrowatt Engineering Services Ltd.
- Sabbour Associates

Constructeur génie civil

- Joint-venture composée de
- Campenon Bernard SGE, gérant
- Arab Contractors, cogérant
- Dumez GTM, cogérant
- Spie Batignolles, cogérant
- Bouygues
- DTP
- Eiffage
- GTM International

Cotraitants

- Solétanche
- Bachy
- Intertectra

► rassurer le client en apportant une réponse à chacun des points sur lesquels il avait été mis en alerte. Nous avons imaginé les différents scénarios d'accident de construction, et nous avons présenté les solutions que nous anticipions afin d'y remédier. Cette analyse a eu également le mérite de recadrer les limites de responsabilité entre le constructeur et le client, maître d'œuvre et futur exploitant. Une étude hydrologique complémentaire a été commandée au "Nile Research Institute" par le client afin de confirmer les paramètres d'affouillement qui nous avaient été préalablement fournis. Ce rapport a conclu sur la nécessité d'une campagne bathymétrique annuelle au droit du tunnel pour vérifier l'épaisseur de la couverture. Le manuel de maintenance qui est actuellement en cours de rédaction reprendra cette recommandation. Un décret ministériel réglera toute nouvelle construction sur les berges à proximité du tunnel. Trois sections instrumentées par convergencemétrie, nivellement et mesure d'ouverture de joints de voussoirs feront partie du programme d'auscultation.

Améliorations apportées à la machine

La campagne géologique ne faisait apparaître aucun changement notable dans la séquence des couches alluvionnaires, la hauteur de couverture était maintenant suffisante avec le rechargement précédemment exécuté et par conséquent aucune difficulté de creusement n'était réellement recensée. Cependant, l'analyse des risques mettait en évidence les difficultés potentielles d'un arrêt du creusement dans les conditions de traversée sous fluviale. De fait, il apparut nécessaire de conforter les constituants essentiels liés à la production. Dans cet esprit, tous les composants matériels pouvant entraîner un blocage de l'avancement du tunnelier ont été identifiés. Ceux-ci sont regroupés sous trois rubriques :

- ◆ creusement ;
- ◆ qualité de la boue ;
- ◆ matériels d'approvisionnement.

Creusement

Ce titre recouvre en fait tout ce qui est lié à la chambre d'abattage. L'entreprise ne prévoyait aucune visite sous air comprimé dans la chambre d'abattage pendant les traversées sous fluviales. De ce fait tous les systèmes semblant mériter une protection supplémentaire ont été sécurisés. A savoir :

- ◆ joint d'étanchéité du roulement par ajout d'une bague labyrinthe et pompage de graisse additionnel pour prévenir toute pollution du roulement au point bas, là où la pression de boue est la plus forte (passage sous le petit Nil) ;
- ◆ mise en place d'un concasseur à mâchoires pour

éviter tout blocage de l'aspiration du marinage au point le plus critique du tunnelier. Rappelons que la rencontre inopinée de blocs avait été expérimentée sur un lot de la phase précédente et avait considérablement perturbé l'avancement voire même nécessité plusieurs interventions sous air comprimé dans la partie avant du tunnelier. En l'occurrence, un blocage de l'aspiration avait été à l'origine d'un fontis malgré la présence de deux agitateurs censés éviter un tel incident ;

- ◆ mise en place d'outils neufs systématiquement avant démarrage des creusements ;
- ◆ tests de tous les composants des systèmes hydrauliques et air comprimé avant creusement ;
- ◆ vérification des stocks de matériaux incorporés avec réserve égale aux quantités nécessaires pour la traversée.

Qualité de la boue

Modification de la centrale de séparation afin d'intégrer l'inertie du système d'approvisionnement créé par la longueur de la conduite d'approvisionnement. En effet, pour être capable de fournir une qualité de boue toujours optimale, la quantité de boue mère en réserve a été augmentée. En fait, le volume de boue dans la tuyauterie était tel que le retour du matériau excavé se faisait alors que la foration était pratiquement achevée. Il était donc nécessaire de prévoir un dispositif permettant de fournir une qualité constante quelle que soit la dégradation de la boue apportée par le forage. Ce système de "dialyse" se devait d'être dimensionné en prenant en compte les longueurs de tuyaux et donc le volume de réserve devait fournir une quantité égale à un rejet potentiel égal au volume total en retour.

Choix d'une boue de forage de qualité supérieure à la qualité normalement utilisée.

Augmentation de la fréquence des tests de contrôle qualité des paramètres de la boue.

Matériels d'approvisionnement

Les profils en long des deux traversées ont des points bas au milieu du fleuve. Les pentes de part et d'autre des points bas ont été adaptées au profil du lit du fleuve, aux contraintes d'entrée et sortie des stations ainsi qu'aux possibilités du matériel roulant de l'exploitant.

Les pentes retenues sont de 4 %. Les équipements ferroviaires d'approvisionnement ont été vérifiés sur ces valeurs, à pleine charge (transport des voussoirs) en estimant un coefficient de frottement voie/essieux. En fait, un seul locotracteur a suffi pour assurer le transport alors que le calcul semblait démontrer qu'une aide était nécessaire notamment au droit de la rampe d'accès au train suiveur du tunnelier.

Par sécurité cependant, le matériel roulant a été doublé dans le garage pour parer à toute éventualité.

Procédures et paramètres de creusement

Traverser le Nil pour la première fois par en dessous deux cents ans après les Monge, Conté et Caffarelli, représentait plus qu'un symbole, c'était un défi nouveau lancé sur un mode moderne !

La préparation de cette opération a nécessité une remise à plat des éléments essentiels du pilotage du tunnelier. Une sélection de paramètres instrumentés représentant l'essentiel de la supervision de l'état de marche du tunnelier a été réalisée afin de choisir des seuils caractéristiques de fonctionnement. Ayant identifié les critères à suivre plus particulièrement, la conduite à tenir a été décrite pour divers cas de figures et pour différentes valeurs de variation des paramètres.

Il apparut utile de définir des seuils de fonctionnement normaux, dégradés ou même nécessitant un arrêt du tunnelier. Le système pour être efficace devait être limité à un nombre restreint de paramètres à suivre, afin d'éviter toute confusion et ne pas tomber dans l'excès inverse qui aurait amené à une succession d'arrêts intempestifs pouvant à terme représenter un risque supérieur à l'incident potentiellement identifié.

La préparation de cette procédure s'est achevée par une présentation-discussion avec l'ensemble du personnel exécutant. Notons ici qu'ayant une équipe très expérimentée, il fut possible de proposer une organisation suffisamment souple pour faire appel au bon sens des acteurs en place afin de bénéficier, à tout moment, de leur retour d'expérience dans l'appréciation du comportement du tunnelier. Nous avons néanmoins valorisé des seuils d'arrêt ou d'alerte de façon à déclencher des procédures particulières de fonctionnement dès le premier signal d'une anomalie de fonctionnement ou de la dégradation simultanée de plusieurs paramètres.

Enfin, une surveillance particulière a été mise en place pour assurer un creusement non-stop pour les traversées. En particulier, une équipe de bathymétrie en permanence sur le Nil balayant le lit du fleuve régulièrement entre des bouées positionnées quotidiennement à l'axe du tunnel dans la zone à creuser, un poste de travail complémentaire pour assurer le travail continu du tunnelier, une astreinte pour le personnel d'encadrement.

Scénarios d'accident et solutions envisagées

Les accidents potentiels sont essentiellement de deux ordres, mécaniques ou géologiques.

Un accident mécanique du type rupture du roulement a été envisagé dès le lancement de projet. A ce titre, après audit du fabricant, le système de joints a été revu et cette amélioration, décrite plus haut, a permis d'être plus confiant avant creuse-



Photo 6
Le tunnel
sous le bras principal
du Nil

Tunnel
under the main arm
of the Nile

ment. D'autres incidents ont été examinés tels que la rupture du joint de queue ou d'articulation. En dernier recours d'un incident majeur, le système envisagé consistait à mettre en œuvre un massif de terrain stabilisé par injection autour du tunnelier pour pratiquer une réparation si elle s'avérait nécessaire.

A l'identique, un incident géologique entraînant l'arrêt de l'avancement à défaut d'être qualifié à ce stade de l'analyse devait au moins envisager deux types principaux de défaillances :

- ◆ arrêt du tunnelier par impossibilité de conserver la pression de bentonite dans la chambre d'abatage et, perte totale dans le terrain ;
- ◆ fontis identifié dans le lit du fleuve sans perte totale de la pression de boue.

Dans le cas d'une panne mécanique importante sur le roulement comme dans le cas d'une dégradation substantielle des terrains, un traitement de terrain depuis la surface devait être envisagé. Bien que ne pouvant pas entrer ici dans le détail des hypothèses étudiées, l'entreprise a pris comme précautions de vérifier :

- ◆ la disponibilité des pontons nécessaires à une intervention ;
- ◆ la disponibilité éventuelle des équipements de forage et d'injection ;
- ◆ la définition des types de traitement en fonction de plusieurs cas spécifiques ;
- ◆ la disponibilité des matériaux incorporés.

Pour le cas plus simple du fontis identifié dans le lit du fleuve nous avons gardé en astreinte un équipement d'intervention rapide constitué de :

- ◆ ponton équipé d'une pelle à câble ;
- ◆ barge chargée de sable, enrochements, sacs de sable.

CONCLUSION

On peut facilement qualifier l'exécution (photo 6) de la traversée sous fluviale comme étant un "long fleuve tranquille".



Photo 7
Phase 2B.
Vue générale
des travaux
en cours
Phase 2B.
General view
of works in progress



La réalisation de la phase 2A met en exergue une fois encore, le degré d'expertise qu'ont les majors du BTP français à préparer, coordonner, maîtriser les risques et exécuter dans des temps records, des ouvrages complexes à l'international.

Ce succès n'aurait pu être aussi probant sans la volonté farouche du client d'achever au plus vite l'ouvrage, laquelle n'avait d'égal que son professionnalisme de maître d'œuvre "majeur et vacciné".

Pour le groupement les retombées commerciales d'une telle réalisation ne se sont pas faites attendre sur le plan local :

- ◆ dès 1997, attribution du génie civil de la phase 2B, chantier qui progresse aujourd'hui de façon satisfaisante (photo 7) ;

- ◆ et depuis moins d'un an, nouveau défi avec l'étude et la réalisation dans le cadre d'un contrat "design and built" d'un tunnel routier bi-tube de 2,5 km sous Le Caire Fatimide.

ABSTRACT

The extension of Cairo's metro line 2 and the crossing under the Nile River

J. Petit, A. Roussin, P. Ramond

The extension of the metro line in Cairo is a good example of the successful organisation and preparation of a major design-build contract abroad. The impact of the works on the urban environment as well as the crossing of the Nile River were mastered thanks to appropriate risk analyses.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Verlängerung der U-Bahn-Linie Nr. 2 in Kairo mit der Nil-Unterquerung

J. Petit, A. Roussin, P. Ramond

Die Verlängerung einer Kairoer U-Bahn-Linie ist ein gutes Beispiel für die erfolgreiche Organisation und Vorbereitung eines großen Planungs- und Bauvertrags im Ausland. Die Auswirkungen der Arbeiten auf das urbane Umfeld und die Nil-Unterquerung wurden dank geeigneter Risikoanalysen einwandfrei bewältigt.

RESUMEN ESPAÑOL

Ampliación de la línea 2 del metro de El Cairo y la travesía subfluvial del Nilo

J. Petit, A. Roussin y P. Ramond

La ampliación de la línea del metro de El Cairo constituye un perfecto ejemplo de organización y de preparación perfectamente lograda de un gran contrato de diseño-construcción en la esfera internacional.

Las incidencias de las obras con respecto al medio ambiente urbano, así como la travesía subfluvial del Nilo se han podido dominar por medio de análisis de riesgo adecuados.



Forbach (Moselle)

Construction d'un collecteur d'eaux usées en souterrain avec reprise des branchements particuliers en service

Pour la construction d'un égout unitaire Ø 2,30 m à faible profondeur, en remplacement d'un collecteur existant en mauvais état, les contraintes d'environnement ont conduit le District de Forbach à choisir une méthode de réalisation en souterrain.

La faible profondeur induisant la rencontre de nombreux obstacles, notamment de branchements particuliers d'eaux usées en service, la technique retenue pour la réalisation de cet ouvrage est le creusement au tunnelier à attaque ponctuelle avec mise en œuvre de voussoirs en béton armé.

La particularité de ce chantier est la collecte dans le tunnel, des branchements particuliers et bouches d'égout, au fur et à mesure de leur interception, sans interruption du service.

■ LES CONTRAINTES DU PROJET, LE CHOIX DES MÉTHODES

Dans le cadre de la modernisation de son réseau d'assainissement, le District de Forbach a récemment confié à la société CSM Bessac la réalisation d'un collecteur d'assainissement unitaire.

Ce collecteur de 2300 mm de diamètre, long de 800 m, est destiné, d'une part à remplacer un collecteur existant très vétuste, d'autre part à alimenter un bassin de rétention.

Ce chantier présentait une contrainte importante : l'obligation de maintenir en service le collecteur existant ainsi que tous les branchements particuliers d'eaux usées ou bouches d'égout desservant les riverains.

Bien que ce collecteur soit à faible profondeur, le District de Forbach a choisi une méthode de réalisation en souterrain, ceci pour les raisons suivantes :

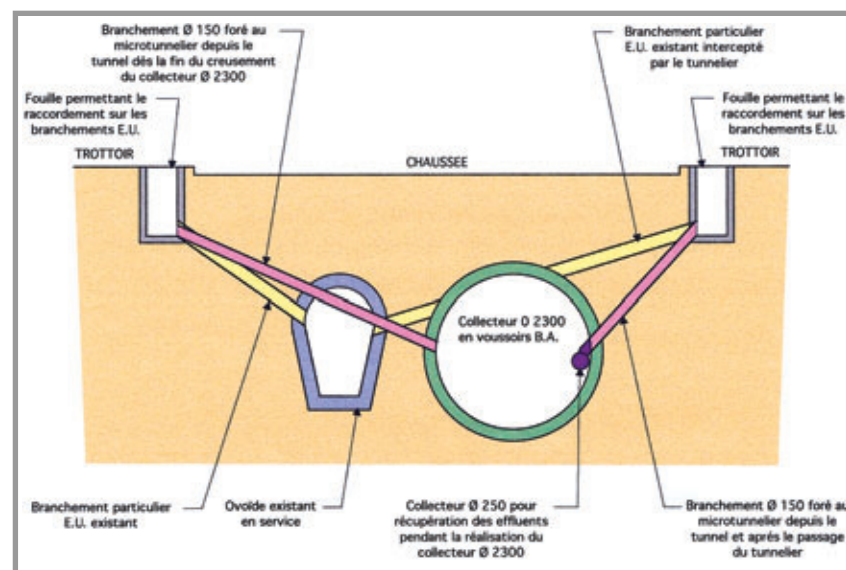
- ◆ la présence de l'ovoïde existant à proximité immédiate en très mauvais état interdisait toute réalisation de tranchée à ciel ouvert (risque important d'effondrement de l'ouvrage en service);
- ◆ la présence de nombreux réseaux de concessionnaires en surface (eau, gaz, télécom, électricité...);
- ◆ le tracé se développe sous une voirie très circulée;
- ◆ la présence de nombreux riverains.

Deux techniques de construction d'ouvrages en souterrain ont été envisagées :

- ◆ le fonçage horizontal de tuyaux;
- ◆ le creusement au tunnelier avec pose de voussoirs en béton armé.

C'est la technique du tunnelier à voussoirs qui a été retenue par le maître d'œuvre, la DDE de la Moselle.

En effet, l'ouvrage constitué de voussoirs est construit



Vue en coupe collecteur et branchements particuliers

Section of collector and private branches

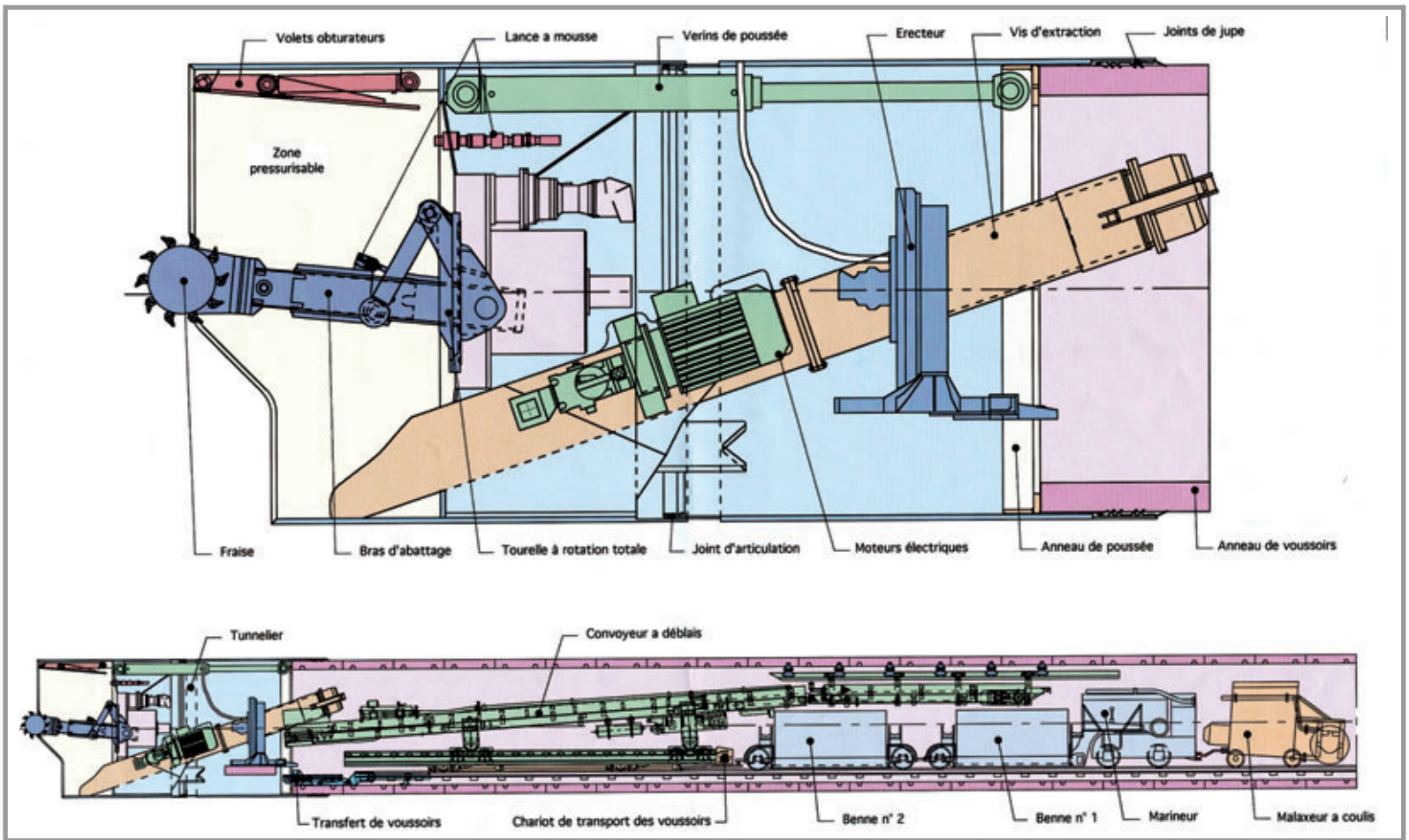
dans la jupe du tunnelier, ceci permet, contrairement au fonçage, de réaliser des tracés sinueux de grandes longueurs sans puits intermédiaire. Cette technique a également permis, et c'est la particularité de ce chantier, de reprendre et de collecter à l'avancement, sans interruption de service, les branchements particuliers d'eaux usées et les bouches d'égout existants, rencontrés à l'avant du tunnelier.

■ RÉALISATION DES TRAVAUX

Ce collecteur – creusé dans des sables, sables gréseux et des grès – a été réalisé à l'aide d'un tunnelier pressurisable à attaque ponctuelle, conçu et construit par CSM Bessac.

Le tracé présente de nombreuses courbes, la couverture de terrain entre la chaussée et l'extrados de l'ouvrage varie de 1 à 4 m.

La présence de l'ovoïde en service, à proximité im-



Tunnelier pour la construction d'ouvrages diamètre 2280 mm intérieur en voussoirs BA

TBM for the construction of structures of 2280 mm inner diameter in reinforced-concrete segments



médiate (entre 0,50 et 1,40 m), a nécessité un pilotage précis du tunnelier, avec notamment une courbe en fin de tracé d'un rayon de 80 m. Trente-cinq branchements particuliers eaux usées (EU) et quinze bouches d'égout eaux de pluie (EP) ont été rencontrés par le tunnelier et collectés à l'avancement. Cinquante-et-un branchements EU ou bouches d'égout EP, non rencontrés par le tunnelier ont été raccordés, à partir du tunnel, en deuxième phase, après le creusement.

Le tunnelier

Le tunnelier est du type fermé, pressurisable et à attaque ponctuelle. Il est articulé. Il assure le creusement des terrains et leur soutènement, il permet la construction du revêtement définitif. Il assure enfin le chargement des déblais pour leur évacuation. Le tunnelier comprend deux parties, la partie avant, le bouclier, qui supporte l'essentiel des composants du tunnelier, et la partie arrière, la jupe, dans laquelle est assemblé, à l'aide de l'érecteur, le dernier anneau de revêtement du tunnel. Le bouclier comporte une cloison médiane qui sert de support à la machine ponctuelle d'abattage. Cette cloison isole la chambre d'abattage de la partie arrière dans laquelle évoluent les opérateurs du tunnelier; elle protège donc le personnel contre les risques inhérents au terrain. Elle est destinée par ailleurs, en cas de travail sous la nappe, au confi-

nement du front de taille à l'air comprimé. Les opérateurs du tunnelier observent le front de taille à travers des hublots. Cette cloison permet le passage des hommes par une porte. Ceci autorise l'intervention manuelle pour la réduction d'éventuels obstacles rencontrés à l'avant du tunnelier, sans occasionner d'arrêt de production important. La machine ponctuelle d'abattage, intégrée au tunnelier, assure le creusement du terrain. Elle est constituée, d'un bras télescopique muni d'un outil d'abattage (une fraise) et articulé sur une tourelle à rotation totale, et d'un convoyeur de chargement à vis qui assure le transport des déblais depuis le front de taille vers l'arrière du tunnelier. La machine d'abattage permet le creusement de tous types de terrains, meubles ou compacts jusqu'à des duretés de 50 MPa (ponctuellement, jusqu'à 100 MPa). Le front de taille peut être blindé, par un dispositif mécanique d'obturation constitué de trois panneaux d'acier, articulés à proximité du bord d'attaque du bouclier et commandés par des vérins hydrauliques. Ce dispositif est utilisé, notamment, lors de l'accès des hommes au front pour assurer leur sécurité. Le tunnelier progresse, au fur et à mesure du creusement, grâce à des vérins qui prennent appui sur le revêtement posé dans la jupe. Ce revêtement est constitué de voussoirs en béton armé préfabriqués en usine par la société Bonna. Ces voussoirs sont acheminés au travers du dispositif de

marinage et mis en place dans la jupe à l'aide de l'érecteur intégré au tunnelier.

Pendant la progression du tunnelier, une injection de mortier actif, composé de ciment, de sable et de bentonite, est réalisée, autour des voussoirs. Cette injection a pour but d'occuper l'espace annulaire pouvant exister entre le contour excavé et celui du voussoir, et d'éviter ainsi toute décompression du terrain.

Les transports en galerie (déblais, voussoirs, mortiers...) sont assurés par un train de marinage constitué d'une locomotive électrique, de deux bennes à déversement latéral de 4 m³, d'un wagon à mortier avec malaxeur et pompe d'injection, et d'un wagon à voussoirs.

Pour assurer la liaison entre le tunnelier et le marinage, un train suiveur est attelé au tunnelier. Ce train suiveur comprend trois remorques à l'intérieur desquelles sont intégrés les éléments suivants :

- ◆ un convoyeur à bande, assurant la reprise des déblais sous la vis et le chargement des wagons ;
- ◆ un convoyeur à voussoirs à galets automoteurs assurant le déchargement, le stockage et le transfert des voussoirs vers l'érecteur ;
- ◆ un alimentateur à voussoirs assurant le transfert entre le convoyeur et l'érecteur.

Rencontre d'un fossé antichar

Le tunnelier à attaque ponctuelle a pour avantage de permettre des interventions manuelles au front de taille en cas de croisement d'obstacles. Outre les branchements particuliers qui étaient prévus, le tunnelier a trouvé de nombreux obstacles imprévisibles.

Ainsi les fondations des pylônes supportant les caténaires de l'ancien tramway ont été rencontrées à plusieurs reprises.

Autre obstacle important : la découverte d'un ancien fossé antichar datant de la deuxième guerre mondiale. Ainsi sur une dizaine de mètres, de nombreuses interventions ont été nécessaires pour découper des profilés métalliques, des fils de fer barbelés, des blocs de béton armé, etc.

De nombreux obstacles imprévus se sont également succédés : anciens collecteurs, câbles, blocs, maçonneries, etc.

De même le tunnelier a recoupé de nombreuses failles et zones déconsolidées liées aux affaissements miniers.

Reprise des branchements rencontrés sur le tracé du tunnelier

Principe

Les branchements particuliers ou bouches d'égout situés sur la trajectoire du tunnelier étaient découverts et repris dans le collecteur diamètre



Rencontre d'obstacle imprévu : câbles électriques abandonnés

Unexpected encounter : abandoned electrical cables



Branchement particulier eaux usées recoupé par le tunnelier

Private wastewater connection intercepted by the TBM

2300 mm, avec une interruption de service minimum.

La collecte des effluents était assurée par un collecteur en PVC Ø 250 mm posé sur des supports fixés sur les voussoirs et raccordé dans le puits de départ sur l'ovoïde existant.

Les branchements étaient raccordés sur le collecteur PVC Ø 250 mm, après passage du tunnelier, par forage au microtunnelier réalisé depuis le tunnel.

Opérations préalables au passage du tunnelier

Avant le passage du tunnelier, chacun des branchements situés sur la trajectoire du tunnelier était repéré en surface. Une fouille était préalablement réalisée, sur chaque branchement en prévision du raccordement du branchement existant sur le collecteur Ø 2300 mm.

Rencontre des branchements par le tunnelier

Les branchements étaient repérés visuellement pendant le creusement par l'opérateur de la machine d'abattage.

Dès la rencontre du branchement, la progression du tunnelier était interrompue.

Un homme entrait dans la chambre d'abattage pour dégager manuellement le branchement. Il assurait un repérage précis du branchement (inclinaison, hauteur par rapport à la casquette du tunnelier, distance par rapport au dernier anneau posé).

Le branchement était alors découpé de part et

Collecte provisoire d'un branchement eaux usées en service, dans la galerie en cours de creusement

Provisional collection of a wastewater connection in service in the gallery being dug



Forage au microtunnelier pour raccordement des branchements particuliers eaux usées

Drilling with micro-tunneller for the connection of private wastewater branches



Galerie diamètre 2,30 m en voussoirs béton armé
Gallery of 2,30 m diameter with reinforced-concrete segments



► d'autre du tunnelier et obturé. Avant cette opération un pompage provisoire des effluents était mis en place, en surface dans la fouille prévue pour le raccordement.

Reprise des branchements après passage du tunnelier

Le raccordement des branchements sur le collecteur PVC Ø 250 s'effectuait lorsque l'arrière du tunnelier avait franchi le voussoir sur lequel le branchement était raccordé.

Les branchements étaient reforés au microtunnelier, avec chemisage en tuyau PVC Ø 150, depuis l'intérieur du collecteur Ø 2300, entre l'intrados du voussoir et la fouille prévue pour le raccordement.

Reprise des branchements ou bouches d'égout non rencontrés par le tunnelier

Ces branchements sont reconstruits par forage au microtunnelier avec chemisage en tuyau PVC Ø 200, à partir du collecteur Ø 2300.

Cette opération est réalisée en deuxième phase, après la fin du creusement du collecteur.

■ UNE TECHNIQUE DE CREUSEMENT SÛRE ET POLYVALENTE

Ce chantier très technique s'est déroulé dans les meilleures conditions de sécurité et de qualité.

La durée totale des travaux fut de 9 mois ; le creusement a duré 4 mois et demi.

La technique mise en œuvre a, une fois de plus, montré sa grande souplesse et ses possibilités d'adaptation à la particularité de chaque ouvrage, particularité géologique, ou particularité technique.

Rappelons que le précédent chantier réalisé par ce même tunnelier est un collecteur creusé sous le lac Léman à Genève, dans des alluvions et des argiles fluentes avec une hauteur d'eau de 9 m et une couverture de terrain de 3 m.

L'exemple des chantiers en cours de réalisation par CSM Bessac montre la polyvalence de cette technique.

À Chevilly-Larue (Val-de-Marne)

Pour le département du Val-de-Marne, creusement à l'aide d'un tunnelier à attaque ponctuelle d'un collecteur Ø 1800 mm de 1500 m de long creusé dans des argiles vertes et des marno-calcaires de Brie.

Les originalités de ce chantier résident dans :

- ◆ le revêtement qui est réalisé en deux phases :
 - un soutènement provisoire mixte constitué, de cintres et de bastinges en bois dans les zones étanches, de voussoirs acier dans les zones soumises à la nappe phréatique,
 - un revêtement définitif en béton armé mis en place par coffrage après la fin du creusement de la galerie ;
- ◆ le raccordement de branchements particuliers sur ce collecteur profond (15 m) d'eaux usées. Ceux-ci sont réalisés, depuis la surface, par des forages inclinés équipés en tubes Ø 200 mm.

À Paris

Pour la SAGEP, dans le cadre du projet LIRE Sud, réalisation d'une galerie en voussoirs BA Ø 1840 mm, longue de 400 m en courbe, creusée au tunnelier à confinement par air comprimé, sous le boulevard périphérique près de la porte de Sèvres. Après son creusement on enfilera dans cette galerie une condui-



Tunnelier
pressurisable
à attaque ponctuelle
*Pressurisable
point-attack TBM*

te pression Ø 1 400 mm en acier. Ce chantier est très technique :

- ◆ par l'environnement (peu de place pour l'installation, proximité d'ouvrages sensibles : RATP, galeries, boulevard périphérique);
- ◆ par la géologie (une nappe très active, des terrains constitués d'alluvions anciennes très perméables).

À Franconville (Val-d'Oise)

Pour le SIARE avec maîtrise d'œuvre SIAAP réalisation d'un collecteur Ø 2 000 mm de 600 m de long avec revêtement par voussoirs BA.

Ce collecteur est creusé dans un terrain marno-calcaires sous influence de la nappe phréatique, à l'aide d'un tunnelier à confinement par air comprimé.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

District de Forbach

Maitre d'œuvre

DDE de la Moselle - Subdivision de Forbach

Entreprise

CSM Bessac (31 790 Saint-Jory)

ABSTRACT

**Forbach (Moselle)
Construction
of a wastewater collector
underground with the
connection of private
branches in service**

J.-N. Lasfargue

For the construction of a unit sewer of 2,30 m diameter at a shallow depth, as a replacement for an existing collector in poor condition, the environmental constraints led the District of Forbach to choose an underground construction method.

wastewater branch connections in service, the technique adopted for the construction of this structure is the point attach TBM also placing the reinforced-concrete segments.

The particular feature of this site is the collection in the tunnel of private sewer outlet branches as they are intercepted, without interrupting service.

DEUTSCHES KURZREFERAT

**Forbach (Departement
Moselle)**

**Bau eines unterirdischen
Abwassersammlers mit
Aufnahme der in Betrieb
befindlichen
Hausanschlüsse**

J.-N. Lasfargue

Im Rahmen des Baus einer Abwasserkanalisation mit Ø 2,30 m in geringer Tiefe als Ersatz für einen vorhandenen, nicht mehr brauchbaren Sammler haben die Umweltvorgaben den Distrikt Forbach veranlaßt, eine unterirdische Ausführungsmethode zu wählen.

Da aufgrund der geringen Bautiefe zahlreiche Hindernisse zu bewältigen waren, insbesondere in Betrieb befindliche Hausanschlüsse, wurde bei dieser Baumaßnahme auf die Technik der Tunnelbaumaschine mit Punktausbruch und den Einsatz von Stahlbetonwölbern zurückgegriffen.

Als Besonderheit ist dabei erwähnenswert, daß die Hausanschlüsse und Straßeneinläufe entlang der Strecke ohne Betriebsunterbrechung in den Tunnel eingebracht worden sind.

RESUMEN ESPAÑOL

**Forbach (Mosela)
Construcción
de un colector de aguas
vertidas en subterráneo,
con reintegración de las
conexiones particulares
en servicio**

J.-N. Lasfargue

Para la construcción de una alcantarilla unitaria de 2,30 de diámetro a poca profundidad, en sustitución de un colector existente en mal estado, los imperativos medioambientales han conducido al Distrito de Forbach a optar por un método de ejecución de forma subterránea.

La profundidad reducida daba lugar a tropezar con numerosos obstáculos, y fundamentalmente de conexiones particulares de aguas vertidas en servicio, motivo por el cual la técnica adoptada para la ejecución de esta estructura ha consistido en el empleo del tunelero de ataque puntual con implementación de dovelas de hormigón armado.

La particularidad de estas obras consista en la colecta en el túnel, de las conexiones particulares y bocas de alcantaría, a medida que se ha efectuado sin intercepción y ello sin interrupción del servicio.

La réparation des tunnels de Virignin sur la RN 504 dans l'Ain

La réparation des tunnels de Virignin sur la RN 504 dans l'Ain comprenait les travaux d'alésage, étanchement et revêtement béton de deux tunnels routiers de 80 et 66 m. Réalisés en 3 mois et demi ils se sont terminés huit semaines en avance sur le planning contractuel, réactualisé.

Pour ce faire : 1150 m³ de déblais à l'explosif, 250 m³ de béton projeté, 570 ancrages de 3 m, 2025 m³ de béton et 2800 m² d'étanchéité ont été mis en œuvre.

Les travaux ont été réalisés sous trafic routier avec fermeture de la circulation de 21 h 00 à 5 h 00 au rythme de 4 jours travaillés par semaine.

Les deux tunnels de Virignin sont situés sur la rive droite du Rhône, à la hauteur du pont de la Balme sur la RN 504 (2 x 1 voie) entre Virignin dans le département de l'Ain et Yenne en Savoie (figure 1).

Le tunnel n° 1 courbe, situé à l'ouest côté Virignin a une longueur de 80 m environ. Le tunnel n° 2 d'une longueur de 66 m environ est droit et se situe à l'est côté pont de la Balme.

Ceux-ci ont été creusés en 1945, et un gunitage de faible épaisseur a été effectué en 1958 à titre d'entretien sur les sections courantes.

La RN 504 est un axe routier vital entre Chambéry et Lyon, très fréquenté (plus de 2000 poids lourds par jour) où l'on recense (dans les tunnels) une vingtaine d'accidents ou chocs quotidiens.

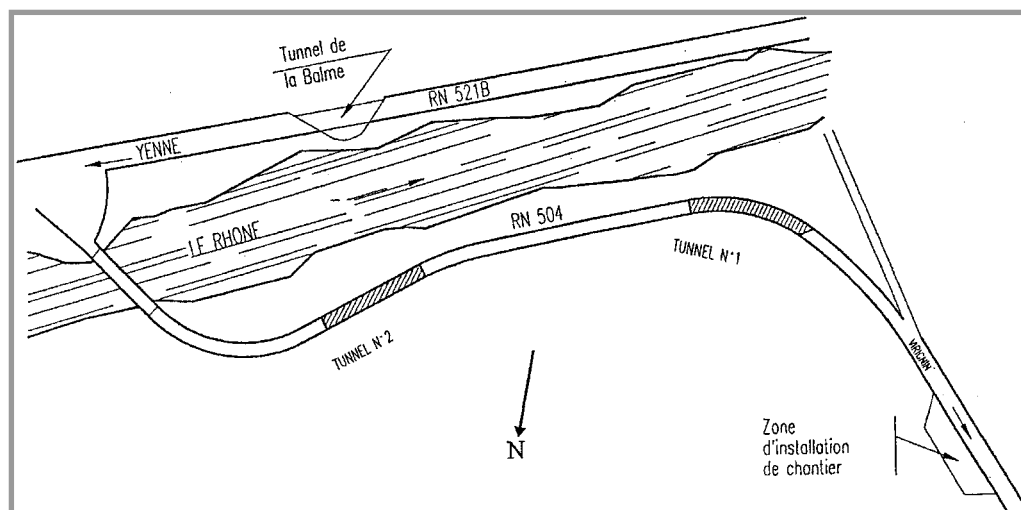


Figure 1
Plan de situation
Location

OBJET DES TRAVAUX

Le Cetu a effectué une inspection détaillée des deux tunnels et établit les constats suivants :

- ◆ une altération du revêtement de gunite générant des instabilités en voûte ;
- ◆ la présence de venues d'eau généralisées à certaines époques de l'année, facteur aggravant tant du point de vue dégradation que d'exploitation hivernale ;
- ◆ la nécessité d'élargir ponctuellement la chaussée dans le tunnel n° 1 (difficulté de croisement entre deux poids lourds).

Les travaux à entreprendre pour les deux tunnels s'établissaient donc comme suit :

- ◆ alésage (figure 2). Pour le tunnel n° 1 environ 1,50 m côté nord et 0,75 m côté sud. Pour le tunnel n° 2 environ 0,50 m sur le périmètre ;
- ◆ étanchement des deux tunnels ;
- ◆ revêtement en béton coulé en place.

Les têtes des tunnels ne sont pas modifiées en géométrie.

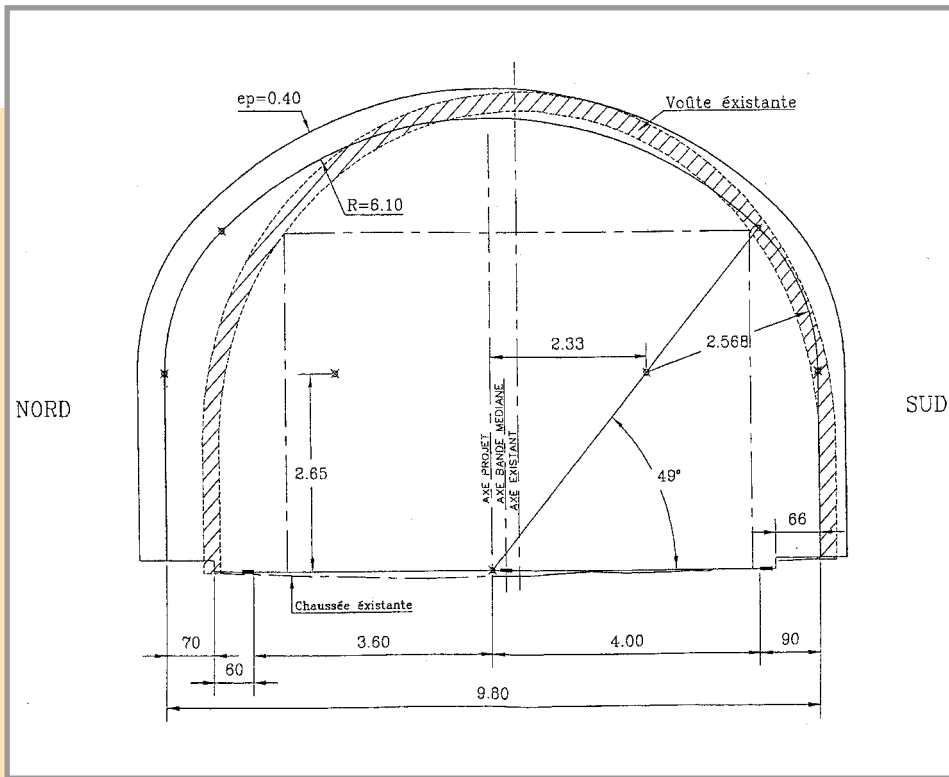


Forage
au robofore
Boring
with the Robofore

CONTRAINTES DU CHANTIER

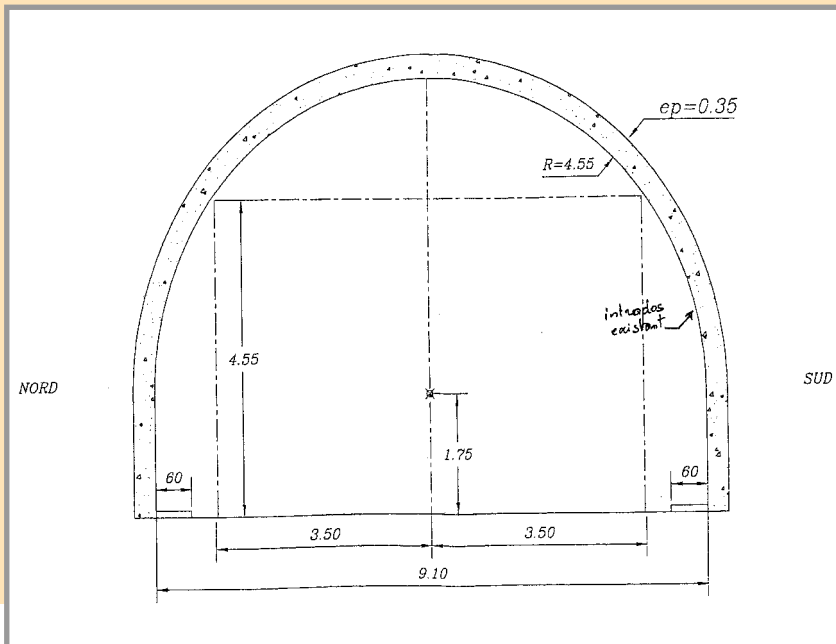
Les travaux ont dû faire face à deux difficultés principales :

- ◆ la circulation :
 - totalement interrompue entre 21 h 00 et 5 h 00,
 - avec alternat (une voie) de 5 h 00 à 21 h 00 pendant les jours travaillés (4 jours par semaine du dimanche soir au vendredi matin) ;



Le poste de béton projeté
Pingon BRH in action

Figure 2
Définition géométrique
des deux tunnels.
Ci-dessus tunnel n° 1,
ci-contre tunnel n° 2
Geometrical definition
of the two tunnels.
On top : tunnel 1;
on right : tunnel 2



Tête de tunnel n° 2.
Raccordement de 70 cm en coffrage traditionnel
sur la tête existante

Tunnel head 2.
Connection of 70 cm of conventional formwork
on the existing head



Pose de l'étanchéité
du tunnel
sur le fourgon échafaudage
Placing the waterproofing
of the tunnel
on the scaffold van



◆ les conditions hivernales difficiles entre novembre 1998 et février 1999.

■ DÉROULEMENT DES TRAVAUX

Travaux de terrassements

Les travaux ont démarré le 29 octobre 1998. Dans le tunnel n° 1 furent menées les opérations suivantes :

- ◆ alésage à l'explosif en utilisant un robofore trois bras (volée de 4 m);
- ◆ déblais et fondations à l'explosif en utilisant un chariot de forage CFL.

Pour le tunnel n° 2 l'entreprise a conduit successivement :

- ◆ l'alésage au BRV;
- ◆ les déblais et fondations à l'explosif en utilisant un chariot de forage CFL.

Tous ces travaux ont été réalisés hors circulation.

Les opérations dans les deux tunnels ont été exécutées en simultanément avec un décalage de deux semaines.

Pour des raisons de sécurité travaux (sous circulation) l'alésage nécessita l'application de béton projeté (2 + 4 cm) mis en œuvre par voie sèche et d'ancrages ponctuels de longueur 3 m.

Ces principales quantités sont reportées en encadré.

■ ÉTANCHÉITÉ

Elle fut conduite en poste de nuit sur la totalité de la surface des deux tunnels.

Les éléments suivants furent mis en œuvre :

- ◆ géotextile : 2 800 m²;
- ◆ membrane 15/10^e : 2 800 m²;
- ◆ protection 17/10^e : 500 m²;
- ◆ compartimentage : 320 ml.

■ TRAVAUX DE BÉTON

Compte tenu de la différence de géométrie des deux tunnels, le bétonnage a été réalisé par plots de 6 ml à partir d'un outil coffrant métallique. Celui-ci a été conçu pour un bétonnage de l'ensemble de la section en une seule phase via des fenêtres et pipes de bétonnage et conçu :

- ◆ d'un portique porteur pour les deux sections différentes des deux tunnels constitué par une ossature HEB sur quatre pieds équipés de roues et crics manuels;
- ◆ de deux passerelles latérales et d'une passerelle centrale sur le portique. L'ensemble de l'outil est positionné sur des rails. Pour chaque tunnel une peau coffrante métallique se déplaçant sur rails



Le poste de forage caniveau

Gunit station

a été prévue. Le serrage du béton étant assuré par 18 vibreurs répartis sur 24 platines (2 x 4 lignes de 3).

Le bétonnage du tunnel n° 2 a été réalisé en premier, suivi par le tunnel n° 1.

Principe du cycle de bétonnage

Il s'établit de la manière suivante :

- ◆ de 10h00 à 12h00 :
 - démontage du masque,
 - débutonnage du pied;
- ◆ de 12h00 à 21h00 :
 - décoffrage des jupes,
 - décintrement du coffrage,
 - avancement du coffrage,
 - nettoyage peau coffrant et graissage,
 - remise en place et réglage du coffrage,
 - butonnage du pied,
 - réalisation du masque;
- ◆ de 21h00 à 0h30 :
 - alignement du portique sous le coffrage,
 - mise en place des butons sous le coffrage,
 - coulage des piédroits par les fenêtres;
- ◆ de 0h30 à 2h30 :
 - coulage de la voûte par les pipes;
- ◆ de 2h30 à 12h30 :
 - séchage béton pour l'obtention de 12 MPa formule B35 G + S - Chauffé accéléré.

Les principales quantités de béton sont reportées en encadré.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Tunnel n° 1

- 900 m³ de déblais dont 300 m³ de hors profils géologiques
- 120 m³ de béton projeté
- 320 ancres de longueur 3 m

Tunnel n° 2

- 250 m³ de déblais dont 70 m³ de hors profils géologiques
- 130 m³ de béton projeté
- 250 ancres de longueur 3 m

Béton tunnels n° 1 et n° 2

- 400 m³ de béton B35 en fondations
- 1 625 m³ de béton B35 en revêtement piédroits/voûtes
- 2 900 m² de coffrages de revêtement réalisés sous circulation



■ DÉLAI D'EXÉCUTION

Le chantier s'est achevé avec huit semaines d'avance sur le planning contractuel et constitue en cela une véritable performance.

Les jours d'intempéries ont été travaillés grâce à l'utilisation d'un béton chauffé et accéléré ainsi qu'au chauffage de l'outil coffrant.

■ SÉCURITÉ DU CHANTIER

Malgré la mise en place de portiques lourds défensifs aux entrées des tunnels avec limitation de la hauteur libre à 4 m (hauteur réelle 4,40 m) et signalisation adéquate côté Savoie et Ain, on a déploré de nombreux accidents et infractions de poids lourds :

- par trois fois le portique côté Ain a été détruit à 100 %;
- depuis la mise en chantier une soixantaine de chocs et accidents sur portiques étaient enregistrés au 8 janvier 1999.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

État - Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement

Maitre d'œuvre

DDE de l'Ain, service Grands Travaux assistée du Cetu

Entreprise

- Chantiers Modernes - Direction régionale du Sud-Est titulaire du marché
- El-GCC sous-traitant travaux d'étanchéité

ABSTRACT

Repair of the Virignin tunnels on highway RN 504 in the Ain region

G. B. Abou Sleiman

The repair of the Virignin tunnels on highway RN 504 in France's Ain region included the boring works, waterproofing and concrete lining of the two-road tunnels of 80 and 66 m. Completed in three and a half months, they were delivered eight weeks in advance of the updated contractual schedule. To accomplish this, 1 150 m³ of blasted cuttings, 250 m³ of gunite concrete, 570 anchorings of 3 m, 2 025 m³ of concrete and 2 800 m² of waterproofing were deployed. The works were carried out under traffic with the closing of the road from 21 h 00 to 5 h 00, working four days a week.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Reparatur der Tunnel von Virignin auf der Nationalstraße RN 504 im Département Ain

G. B. Abou Sleiman

Die Reparatur der Tunnel von Virignin auf der Nationalstraße RN 504 im Département Ain umfaßte die Bohrungen, die Dichtungsarbeiten und die Betonbeschichtungen der beiden je 80 bzw. 66 m langen Tunnel. Die in einer Zeit von dreieinhalb Monaten abgeschlossene Maßnahme konnte acht Wochen vor dem geplanten (aktualisierten) Termin beendet werden.

Hierfür sind 1 150 m³ Aushub abgesprengt, 250 m³ Beton aufgespritzt, 570 Verankerung (je 3 m) eingesetzt, 2 025 m³ de Beton aufgebracht und 2 800 m² Dichtmaterial verlegt worden. Der Verkehr war während der im Rhythmus von vier Arbeitstagen pro Woche abgewickelten Bauarbeiten nur nachts 21:00 bis 5:00 Uhr unterbrochen worden.

RESUMEN ESPAÑOL

La reparación de los túneles de Virignin en la Carretera Nacional RN 504 en el departamento del Ain

G. B. Abou Sleiman

La reparación de los túneles de Virignin en la Carretera Nacional RN 504 en el departamento del Ain incluía diversos trabajos de ensanche, impermeabilización y revestimiento de hormigón de dos túneles viarios de 80 y 66 metros. Estas obras, ejecutadas en tres meses y medio se han finalizado con un adelanto de ocho semanas con respecto al programa contractual, reactualizado. Para tal finalidad, se han implementado : 1 150 m³ de materiales con explosivos, 250 m³ de hormigón proyectado, 570 anclajes de 3 m, 2 025 m³ de hormigón y 2 800 m² de impermeabilización.

Los trabajos se han realizado sin interrumpir el tráfico viario, pero cerrando la circulación de las 21:00 h a las 05:00 h, con un ritmo de 4 días de trabajo por semana.

L'intercepteur Gennevilliers

L'intercepteur Gennevilliers

- Colombes - Nanterre a pour fonctions :

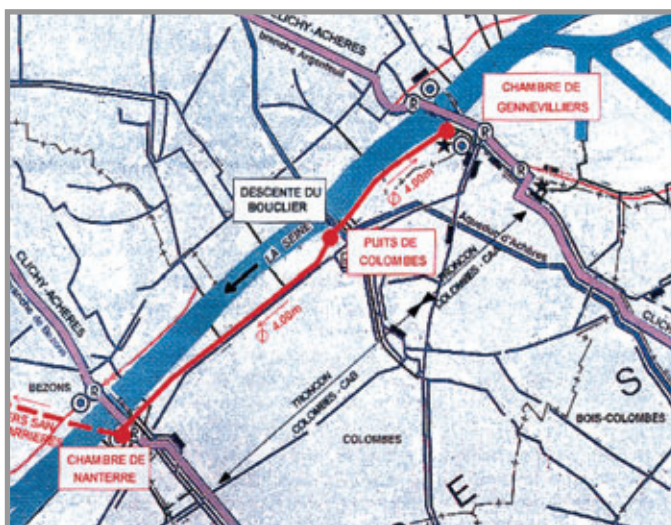
- le maillage du réseau d'émissaires existants ;

- la participation à l'alimentation de la nouvelle usine "Seine Centre" située à Colombes. Celui-ci consiste en une canalisation souterraine de 4 m de diamètre fonctionnant en charge, comportant deux tronçons :

- le tronçon nord-est de 1289 m qui relie le site de Colombes à l'émissaire Clichy-Achères branche d'Argenteuil ;

- le tronçon sud-ouest de 2047 m qui relie le site de Colombes à l'émissaire Clichy-Achères branche de Bezons.

Ces ouvrages sont réalisés à partir d'un puits central, situé à proximité immédiate de l'usine de Colombes, par un tunnelier à pression de boue.



Plan de situation

Location

DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'AMÉNAGEMENT

Pour que l'eau du fleuve retrouve sa qualité, le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (S.I.A.A.P.) poursuit son programme de travaux destiné à supprimer les déversements d'eaux usées dans le milieu naturel. La réalisation de la liaison Gennevilliers-Nanterre est une importante opération au sein de ce programme.

La liaison Gennevilliers-Nanterre doit assurer l'interconnexion entre les émissaires :

- ◆ Clichy-Achères, branche d'Argenteuil ;
- ◆ Clichy-Achères, branche de Bezons.

Elle participera à l'alimentation de la nouvelle usine d'épuration "Seine Centre" à Colombes, par l'intermédiaire d'une station de pompage.

Le puits central est destiné à relier les deux émissaires à cette station, située dans l'enceinte de l'usine par l'intermédiaire de deux galeries de raccordement de même diamètre que la galerie de l'interconnexion.

La partie inférieure de ce puits constitue une chambre, qui permettra le débouché d'un futur tunnel réservoir de grand diamètre, envisagé entre l'usine de Clichy et Colombes pour le stockage des eaux pluviales.

OBJET DU MARCHÉ

Le présent marché concerne :

- ◆ la réalisation du puits central situé dans le parc départemental P. Lagravère à Colombes ;
- ◆ le creusement des deux émissaires ;
- ◆ l'exécution partielle des galeries de raccordement avec la station de pompage.

DESCRIPTION DES TRAVAUX

Aménagement de la plate-forme

Compte tenu de l'exiguïté des terrains mis à disposition par le maître d'ouvrage et de l'état des berges de Seine, il s'est avéré nécessaire de recourir à d'importants travaux.

Le battage de palplanches a permis un recalibrage de la berge, autorisant la réalisation d'une plate-forme située à 6 mètres au-dessus de la Seine, d'une qualité et d'une surface suffisantes, pour permettre l'évolution d'engins lourds et l'exploitation du tunnelier.

Par ailleurs, mise en place de ducs d'Albe et dragage de la Seine au droit du chantier pour assurer l'accostage de péniches de 1000 à 1500 tonnes.

Le puits de Colombes

C'est un ouvrage de 22 m de diamètre et de 48 m de profondeur réalisé en parois moulées de 1,52 m d'épaisseur fichées à 75 m de profondeur dans les argiles plastiques.

Il comprend en outre, un plancher intermédiaire de 1,50 m d'épaisseur établi à 30 m de profondeur. Celui-ci dispose d'une trémie centrale de 5,00 x 7,00 m couverte par des éléments préfabriqués. Ces dispositions ont permis l'introduction de la machine à forer les tunnels entre Gennevilliers et Nanterre, l'évacuation des déblais et l'approvisionnement du chantier souterrain.

A l'issue des travaux, laissant la trémie libre de toute installation, il sera aménagé en chambre de vannes, assurant la répartition des effluents entre les deux branches de l'intercepteur et la jonction vers l'usine d'épuration "Seine Centre" de Colombes.

La réalisation du puits en parois moulées terrassées à l'hydrofraise, constitue une première européenne. En effet, les panneaux de 1,52 m d'épaisseur sont fichés dans l'argile plastique à 75 mètres de profondeur, pratiquement sans déviation.

Les terrains traversés sont les suivants :

- ◆ les remblais de surface : de 0 à 7,5 m ;
- ◆ les alluvions modernes et anciennes : de 7,5 m à -14,5 m ;
- ◆ les mames et caillasses : de -14,5 m à -12,5 m ;
- ◆ le calcaire grossier : de -17,5 m à -32,5 m ;
- ◆ les sables du Soissonnais (sable de Cuise et fausses glaises) : de -32,5 m à -72,5 m ;
- ◆ les argiles plastiques : de -72,5 m à -75 m.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

S.I.A.A.P.

Maître d'œuvre

S.I.A.A.P.

Groupeement d'entreprises

- Borie SAE
- Chantiers Modernes
- GTM Construction
- Chagnaud

Principaux sous-traitants

- Travaux fluviaux : Bouygues Off Shore
- Paroi moulée et injections : Solétanche Bachy
- Tunnelier : Herrenknecht
- Station de traitement : M.S.
- Voussoirs : Stradal
- Mortier bourrage : Cantillana
- Transports déblais et voussoirs : S.C.A.T.

- Colombes - Nanterre

Jean-Charles Averous



DIRECTEUR DE TRAVAUX
Chantiers Modernes

Philippe Pratt



**CHEF
DE CIRCONSCRIPTION
TRAVAUX**
Chantiers Modernes

Le niveau de la nappe phréatique se situe à environ - 7 mètres sous la poutre de couronnement du puits.

Le terrassement à l'intérieur de celui-ci a été effectué à l'aide de pelles et brise-roche hydraulique, la remontée des déblais étant assurée par une grue à flèche treillis de forte capacité et une benne à fond ouvrant de 7 m³.

Les déblais ont été évacués par voie fluviale.

A partir de la dalle intermédiaire du puits ont été creusées :

- ◆ les galeries de montage et de recul du tunnelier de longueurs respectives 20 et 15 m et d'ouverture 7,5 m au terrassement;

- ◆ les deux galeries de raccordement de longueurs totales 60 m et de 5,10 m d'ouverture au terrassement.

Ces travaux ont été réalisés dans le calcaire grossier, par des moyens conventionnels : machine à attaque ponctuelle et soutènement par cintres et blindage.

Une campagne d'injection destinée à étancher les terrains encaissants a précédé l'exécution de ces travaux.

■ LES GALERIES

Celles-ci sont respectivement creusées :

- ◆ dans le calcaire grossier et les marnes caillasses, pour le tronçon Colombes - Gennevilliers;

- ◆ dans le calcaire grossier et les sables du Soissonnais pour le tronçon Colombes - Nanterre.

La nature des terrains rencontrés sur ce dernier tronçon a imposé l'utilisation pour l'ensemble d'un tunnelier à pression de boue bentonitique avec régulation à l'air comprimé, conçu spécialement pour ces ouvrages.

Le tunnelier comporte :

- ◆ un bouclier de 4,88 mètres de diamètre et de longueur 11,80 mètres, avec deux articulations. Celui-ci est muni d'une roue de coupe de diamètre 4,92 mètres, à faible pourcentage d'ouverture équipée de vingt-trois molettes et soixante-huit couteaux. Puissance des moteurs d'entraînement 630 kW;

- ◆ un train suiveur de 80 m de longueur sur lequel sont installés les divers équipements pour l'exploitation du tunnelier.

La puissance installée totale est de 1 500 kVA.

Les matériaux sont évacués par marinage hydraulique vers la station de traitement à l'aide de pompes de 250 kW.

■ LE REVÊTEMENT

Les anneaux sont de 4 m de diamètre intérieur, d'épaisseur 30 cm et de longueur 1,30 m.

Ils sont de type universel, constitués de six voussoirs de forme trapézoïdale, d'égale importance.

La liaison entre anneaux est assurée par douze connecteurs en polyamide SPS Sofrasar.

Un barreau en PVC recyclé, complète le positionnement entre voussoirs d'un même anneau. La préhension des voussoirs est réalisée par ventouse.

■ LE MORTIER DE BOURRAGE

Le vide annulaire autour du revêtement est rempli par un mortier à faible activité de granulométrie 0/8 mm. Celui-ci est livré prêt à l'emploi anhydre et prédosé, le malaxage et l'hydratation étant réalisés par vis doseuse.

Le transport au front s'effectue par wagon malaxeur. L'injection est réalisée à l'arrière du tunnelier par des tubulures intégrées à la jupe.

L'approvisionnement de tous les éléments nécessaires à la bonne marche du tunnelier est effectué par convois ferrés.

■ LA STATION DE TRAITEMENT

Les déblais transportés par la boue de marinage sont séparés de celle-ci par un ensemble de trommel et hydrocyclones, au débit de 550 m³/heure. La boue comportant les éléments les plus fins est retirée du circuit par surverse lorsque celle-ci atteint une certaine densité.

Après floculation, décantation et traitement à la chaux, la boue est traitée dans des filtres-presses, afin d'obtenir des galettes "pelletables".

■ DESSERTE DU CHANTIER

Par voie fluviale pour l'approvisionnement des voussoirs et l'évacuation des déblais.

Par voie routière pour le mortier de bourrage, les équipements et les fournitures diverses.

■ CHRONOLOGIE DES TRAVAUX

- ◆ Aménagement de plate-forme : février à mai 1997;
- ◆ Paroi moulée et injections : juin à septembre 1997;



Photo Alex Béraud

Le puits de Colombes
Colombes shaft



Photo Alex Béraud

Section courante en tunnel

Normal section in tunnel

- ◆ Puits et galeries : novembre 1997 à juin 1998 ;
- ◆ Tronçon Colombes-Gennevilliers : juillet 1998 à novembre 1998 ;
- ◆ Tronçon Colombes-Nanterre : février 1999.

■ AVANCEMENTS

Tronçon Colombes-Gennevilliers

Pour cette partie des travaux on a enregistré les données suivantes :

- ◆ nombre de jours de travail : 101 y compris le démarrage du tunnelier et montage des installations définitives ;
- ◆ travail à trois postes : cinq jours par semaine ;
- ◆ moyenne commerciale : 12,7 m/jour ;
- ◆ meilleur mois : septembre 1998 : 431,60 m ;
- ◆ moyenne par poste de travail effectif : 4,90 ml ;
- ◆ meilleur poste : 14,30 m.

Tronçon Colombes-Nanterre

Pour ce tronçon en cours d'exécution on note :

- ◆ travail à trois postes : cinq jours par semaine ;
- ◆ au 6 avril 1999 : 989,30 ml en 50 jours, y compris démarrage du tunnelier et installations définitives ;
- ◆ moyenne commerciale : 19,8 m/jour ;
- ◆ meilleur mois : mars 1999 : 613,60 m ;
- ◆ moyenne par poste de travail effectif : 7,17 ml ;
- ◆ meilleur poste : 14,30 m.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Montant des travaux : 321 millions HT
Délai global d'exécution : 39 mois

Financement

- Agence de l'Eau Seine Normandie : 45 %
- Région Ile-de-France : 20 %
- S.I.A.A.P. : 35 %

ABSTRACT

The Gennevilliers - Colombes - Nanterre intersecting sewer

J.-Ch. Averous, Ph. Pratt

The Gennevilliers - Colombes - Nanterre interceptor was designed with two functions in mind :

- upgrading of existing sewer network ;
- participation in the supply of the new Seine Centre plant located in Colombes. It consists of underground piping of 4 m diameter operating under gravity, with two sections :
- the north-east section 1289 m long, which links the Colombes site to the Clichy-Achères outfall branch of Argenteuil ;
- the south-west section 2047 m long, which links the Colombes site to the Clichy-Achères outfall, Bezons branch. These structures are built from a central shaft located immediately near the Colombes plant, via a slurry-pressure tunnel boring machine.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Der Abfangsammler Gennevilliers - Colombes - Nanterre

J.-Ch. Averous, Ph. Pratt

Der Abfangsammler Gennevilliers - Colombes - Nanterre hat folgende Funktionen :

- Ergänzung des vorhandenen Abwasserleitungsnetzes ;
- Teilversorgung des neuen Klärwerks Seine Centre in Colombes. Es handelt sich hier um eine unterirdische Druckkanalisation mit 4 m Durchmesser, unterteilt in zwei Abschnitte :
- der 1289 m lange Nord-Ost-Abschnitt verbindet den Standort Colombes mit der Leitung Clichy-Achères, Abzweigung Argenteuil ;
- der 2047 m lange Süd-West-Abschnitt verbindet den Standort Colombes mit der Leitung Clichy-Achères, Abzweigung Bezons.

Die Anlagen werden von einem in unmittelbarer Nähe des Klärwerks Colombes gelegenen Zentralschacht aus durch eine mit Schlammdruck betriebene Tunnelbohrmaschine realisiert.

RESUMEN ESPAÑOL

El interceptor Gennevilliers - Colombes - Nanterre

J.-Ch. Averos y Ph. Pratt

El interceptor Gennevilliers - Colombes - Nanterre tiene por funciones :

- la reticulación de la red de emisarios existentes ;
- la participación en la alimentación de la nueva planta Seine Centro, ubicada en Colombes. El interceptor consiste en una canalización subterránea de 4 m de diámetro que funciona en carga, y que consta de dos secciones :
- la sección noreste de 1289 m que pone en comunicación la planta de Colombes con el emisario Clichy-Achères, ramal de Argenteuil ;
- la sección suroeste de 2047 m que pone en comunicación la planta de Colombes con el emisario Clichy-Achères, ramal de Bezons.

Estas estructuras se ejecutan a partir de un pozo central, ubicado en las cercanías inmediatas de la planta de Colombes, por un tunelero que funciona con presión de lodo.

Le traitement architectural routiers en France

Le traitement architectural des têtes de tunnel est devenu chose courante. On assiste maintenant en France au traitement architectural de l'intérieur des tunnels pour répondre à deux objectifs principaux :

- améliorer la sécurité : les différents dispositifs de sécurité présents en tunnel (postes d'appel d'urgence, sorties de secours, garages, abris, etc.) peuvent être repérés plus facilement et identifiés plus rapidement par un traitement spécifique. Il est possible d'attirer l'attention des usagers sur certaines portions dangereuses d'un tunnel comme une courbe prononcée par exemple ;

- améliorer le confort : la traversée d'un tunnel fréquemment congestionné ou d'un très grand tunnel peut être rendue plus agréable par une décoration sur les piédroits.

Le concepteur dispose de plusieurs possibilités suivant l'effet recherché :

- les motifs : les piédroits offrent une surface importante qu'il est aisé de peindre pour faire apparaître des motifs avec des formes et des couleurs très diverses ;

- l'éclairage : les parties à signaler peuvent être plus éclairées avec une ou des lumières de couleurs différentes ;

- le relief : l'attention de l'utilisateur peut être attirée par des formes ou un aspect inhabituels en tunnel.

L'article analyse les objectifs du traitement architectural de l'intérieur des tunnels, décrit l'évolution des différentes réalisations françaises récentes et montre les écueils à éviter.

Photo 1
Motif autour d'une niche de sécurité dans le tunnel de Chamoise
Motif around a safety niche in the Chamoise tunnel



Photo SAPRR

Les anciens ne manquaient pas d'imagination quand ils décrivaient le monde souterrain comme un endroit redoutable où régnait Pluton, le dieu des Enfers. Dans l'Afrique très superstitieuse, c'est Mammy Wata qui est chargée de faire régner la frayeur dans le monde souterrain. De nos jours, on présente encore les tunnels comme des lieux où une catastrophe est possible malgré sa très faible probabilité. Mais nous avons su maîtriser nos peurs et nous traversons un tunnel comme nous prenons l'ascenseur.

Pour rendre l'environnement souterrain plus humain, nous avons pris l'habitude de chercher à le décorer pour le rendre plus sûr, plus agréable et même accueillant (cf. bibliographie [1, 2, 3]). Les ponts [4], les stations de métros [5], les parcs de stationnement souterrains, etc. ont été les premiers à en bénéficier. Pour les tunnels routiers, on a d'abord effectué un traitement architectural des têtes [6]. C'est presque devenu un impératif. Le traitement des piédroits a été réalisé après, d'abord pour des raisons de sécurité puis pour des raisons de confort. L'utilisation de l'éclairage aux mêmes fins est ensuite apparue.

A l'occasion de la Coupe du monde de football, certains gestionnaires de tunnel ont été tentés d'utiliser les surfaces des piédroits pour y apposer de la publicité et récupérer les droits de location de cet espace. En France, un texte réglementaire indique que la publicité et les enseignes en bordure des voies ouvertes à la circulation publique sont interdites. A l'intérieur d'une agglomération, l'autorité investie du pouvoir de police peut autoriser la publicité dans les limites et aux conditions qu'elle prescrit. Cette disposition vise à garantir la spécificité et l'efficacité de la signalisation routière et

protéger les usagers contre les sollicitations d'attention dangereuses pour leur sécurité. Il n'y a pas de panneaux publicitaires dans les tunnels français.

S'agissant d'une activité nouvelle, le vocabulaire n'est pas stabilisé et différents termes sont utilisés pour communiquer sur le sujet : traitement architectural intérieur par analogie au traitement architectural des têtes, traitement intérieur, traitement de l'ambiance intérieure, aménagement, animation, mise en valeur, humanisation, amélioration de la qualité architecturale, habillage, etc.

■ OBJECTIFS

Un tunnel offre un milieu où les repères habituels sont absents et où les conditions d'environnement sont artificielles. Pour rétablir un certain équilibre il faut offrir aux usagers des repères spatio-temporels. Il est nécessaire également d'améliorer leur sécurité et leur confort lors de leur traversée.

Jusqu'alors très rares, des problèmes de claustrophobie sont apparus dans le tunnel du Prado-Carénage à Marseille mis en service en 1993. Au cours de l'année 1995, il a été enregistré 26 appels pour malaise dont 12 étaient dus à la claustrophobie. Le trafic moyen journalier annuel était de 29 000 véhicules. Les usagers qui se savent claustrophobes mais qui peuvent emprunter les tunnels courts sont sans doute surpris par la longueur (2,2 km) et la hauteur sous plafond réduite (3,60 m) de ce nouveau tunnel. Le même phénomène a été également constaté en 1996 et 1997.

Amélioration de la sécurité

Bien que les tunnels ne soient pas globalement moins sûrs que les itinéraires à l'air libre il ne faut pas négliger l'aspect préventif. Il s'agit :

◆ d'une façon générale de faire ralentir les usagers :

- à l'entrée, informer les usagers qu'ils pénètrent dans un tunnel et que leur attention doit être plus soutenue,

- en tunnel, prévenir les usagers de la présence de zones plus particulièrement dangereuses (virage, point haut, point bas, sortie, etc.) ;

◆ d'éviter l'hypovigilance qui peut survenir dès que la longueur du tunnel dépasse quelques kilomètres ;

◆ d'améliorer la perception de la signalisation relative aux équipements de sécurité et des équipements de sécurité eux-mêmes (postes d'appel

de l'intérieur des tunnels

d'urgence, garages, abris, sorties de secours, etc.) (photo 1). Des défauts d'acuité visuelle sont constatés chez certains conducteurs.

Amélioration du confort

Dans les tunnels où les phénomènes de congestion du trafic sont récurrents, c'est-à-dire où l'usager habituel passe quotidiennement un temps non négligeable en tunnel, il importe de lui offrir un environnement visuel agréable. Cela veut dire non seulement propre mais où l'œil peut visionner une image positive.

Bien sûr, il est quelquefois difficile de faire la part de la sécurité et celle du confort et de la recherche d'une certaine esthétique.

UTILISATION DE LA PEINTURE

Les tunnels présentent des surfaces planes importantes qui ont été mises à profit pour capter l'attention de l'usager volontairement ou involontairement. La chaussée comporte de la signalisation horizontale. La possibilité d'utiliser cette surface n'a pas encore été mise à profit en tunnel bien qu'il existe maintenant des revêtements de chaussée de toutes les couleurs. Dans le tunnel sous La Défense sur l'autoroute A14 près de Paris, les trottoirs ont été peints de couleur jaune et noire en alternance pour rappeler le bas des piédroits traité de la même manière.

A cause de la signalisation qu'il peut comporter, le plafond n'est pas non plus utilisé.

Tous les efforts se concentrent sur les piédroits en utilisant les possibilités offertes par la peinture avec des motifs ponctuels ou linéaires.

L'étude de l'influence de la forme et de la disposition des motifs a été étudiée à l'université du Minnesota. Il apparaît que les motifs verticaux renseignent le conducteur sur sa vitesse et sur la courbe des virages. Les motifs horizontaux donnent une information sur la déclivité. Les informations s'additionnent dans une composition du genre "Vichy". Mais elles se perdent dans une combinaison à base de damiers.

Dans un but de sécurité, pour faire ralentir les usagers, on a peint en alternance des barres verticales d'un gris de plus en plus foncé et de différentes couleurs de l'arc-en-ciel dans le nouveau tunnel de Saint-Cloud sur l'autoroute A13, près de Paris en 1976. On a peint à l'entrée sur les piédroits des tunnels de l'autoroute A8 dans le Sud de la Fran-

ce en 1989, un genre de zébra incliné noir et blanc [7] (photo 2). Ces dispositions de motifs étaient censées donner une impression de vitesse et donc les usagers devaient ralentir pour éviter la gêne produite. En l'absence de mesures pour évaluer l'efficacité du système, il n'a pas été possible de savoir si le but a été atteint. On peut toutefois penser que les zébras noirs et blancs qui représentent une image agressive préviennent bien les usagers qu'ils changent d'environnement en entrant dans un tunnel.

Pour améliorer la localisation et la perception des équipements de sécurité, des motifs avec des formes géométriques simples comme des barres, des triangles, des cercles, des ovales ont tout d'abord été utilisés. Leur couleur était noire, brune ou verte se détachant bien sur la couleur de



Photo Escota

Photo 2
Zébras noirs et blancs
dans un tunnel
de l'autoroute A8

*Black and white zebra
in a tunnel
on the A8 motorway*

fond des piédroits qui est le plus souvent jaune pâle. Les motifs pouvaient être groupés en série avec une surface allant en diminuant ou en augmentant jusqu'au point à signaler.

La symbolique des couleurs a été utilisée dans le tunnel sous La Défense. Le piédroit est peint en rouge au niveau des niches de sécurité qui comportent un téléphone d'urgence et un extincteur, en vert au niveau des sorties de secours à l'air libre et en bleu au niveau des locaux techniques en tunnel.

Des repères spatio-temporels sont très souvent placés en tunnel car la peinture permet leur mise en œuvre relativement facilement. On peut indiquer à l'usager la distance qu'il lui reste à parcourir (donc le temps restant à passer) dans le tunnel en peignant le chiffre des points kilométriques sur les piédroits. Pour améliorer leur perception, ces motifs doivent apparaître plusieurs fois avec des di-



mensions différentes et être de couleur vive pour bien trancher par rapport à la couleur de fond du piédroit. Ceci est surtout valable dans les tunnels de plusieurs kilomètres.

Pour permettre à l'usager de se repérer par rapport à son environnement habituel à l'air libre les noms des rues ou des monuments à l'aplomb desquels il passe peuvent être rappelés en clair (avec des caractères alphabétiques) ou évoqués par une fresque. De la même manière dans les tunnels frontaliers, la frontière entre les deux pays peut être signalée en plafond, sur les piédroits et au sol.

Photo 3
Fresque
représentant une forêt
dans le tunnel
de Nogent-sur-Marne
*Fresco representing
a forest
in the Nogent-sur-Marne
tunnel*



Photo DDE 94

De véritables fresques en couleur ont été peintes quelquefois pour évoquer un point singulier. En 1987 par exemple, dans le tunnel de Nogent-sur-Marne sur l'autoroute A86 à l'est de Paris, un panneau représentant une forêt stylisée a été peint à son point bas (photo 3). Il s'agit d'un tunnel urbain, très fréquenté et souvent congestionné.

Les motifs continus sur toute la longueur de tunnels ont ensuite été réalisés. Mais pour ne pas donner une impression de monotonie, ils doivent présenter une certaine variété de formes et de couleurs. Le premier du genre a été un serpent très stylisé dans le tunnel des Treize Vents sur l'autoroute A55 près de Marseille en 1988. Sa forme ludique évoque les grands cerfs-volants chinois. L'idée était de rappeler le nom du tunnel situé dans une région très ventée. En 1989, dans le tunnel sous la Marne, en prolongement du tunnel de Nogent-sur-Marne, les piédroits ont été peints en bleu avec des surfaces de nuances variées afin d'évoquer la rivière sous laquelle passe le tunnel. Certaines taches rappellent des baleines bleues.

Une nouvelle étape allait être franchie en 1993 avec l'animation du tunnel Prado-Carénage à Marseille. C'est un tunnel urbain à péage, comportant deux tubes superposés, d'une longueur de 2,2 km. Dans le tube qui va vers la mer, les piédroits sont ornés de mouettes dans différentes positions de vol au-dessus des vagues. L'ensemble est de couleur bleue. Dans l'autre tube, la couleur dominante est verte pour des feuilles et des arbres courbés

par le vent. Les numéros des niches apparaissent en défoncé dans ces motifs.

Une idée similaire a dicté l'animation du tunnel du Puymorens dans les Pyrénées. Sur ses 4,8 km, les deux piédroits sont agrémentés de silhouettes d'animaux emblématiques différents pour symboliser les deux sens du trajet. Il s'agit du cheval de Mérens sur un piédroit et du mouflon des Pyrénées sur l'autre.

Pour être bien perçus des usagers, les motifs doivent être peints avec anamorphose. Ils sont vus sous un certain angle et pour leur permettre d'être visionnés correctement ils doivent être dessinés en tenant compte de la perspective, c'est-à-dire déformés comme certaines signalisations au sol.

Lorsque le piédroit est revêtu de carrelage, il est possible de créer des dessins géométriques en utilisant des carreaux de différentes couleurs. Les possibilités sont assez restreintes, cependant des petits carreaux de 2 cm de côté ont servi à créer de très belles animations dans des stations de métro.

■ UTILISATION DE L'ÉCLAIRAGE

Les possibilités de l'éclairage n'ont été utilisées que récemment en France. Les niveaux élevés d'éclairage et la couleur permettent d'améliorer le confort visuel d'un volume.

L'éclairage peut être utilisé de différentes manières : statique ou dynamique (variation de niveau dans le temps), avec utilisation des possibilités des couleurs. Les réalisations peuvent être simples ou très sophistiquées.

De la même manière que l'on éclaire plus et avec une lumière différente les passages pour piétons, on peut prévoir un éclairage spécifique pour les dispositifs de sécurité et les courbes prononcées que l'on considère comme dangereuses.

Dans le domaine du confort, la réalisation la plus achevée se trouve dans le tunnel sous La Défense (quartier des affaires). Le deuxième tube d'une longueur de 4,2 km ouvert en 1996, comporte un "événement lumineux" ou "animation scénographique" à l'aplomb de la Grande Arche. Le plus grand tunnel urbain d'Europe justifiait un effort particulier. L'ensemble de l'animation en peinture et en éclairage a coûté 10 millions de francs (1996). Des appareils d'éclairage classiques contenant des tubes fluorescents ont été installés sur les piédroits et le plafond sur 40 m. L'originalité provient du placement des tubes dans une gaine afin de fournir une lumière colorée. Chaque appareil, qui comporte un gradateur, peut être commandé séparément. Un logiciel sophistiqué d'animation permet de réaliser quelque 240 configurations différentes programmées. Le cycle des combinaisons est aléatoire et peut varier de quelques secondes à plusieurs minutes. L'usager qui emprunte le tunnel pour se rendre à son travail a très peu de chance d'ob-

server la même scène plusieurs fois au cours d'une semaine. Une installation simplifiée figurant le drapeau tricolore est implantée sous la préfecture des Hauts-de-Seine.

Un projet original, a été proposé pour le tunnel de Foix d'une longueur de 2,1 km, dans le Sud-Ouest de la France, et qui doit être mis en service en l'an 2000. Au milieu du tunnel il était prévu une voûte étoilée sur 100 m pour rappeler la vision du ciel la nuit. L'effet devrait procurer un sentiment de sécurité et d'apaisement par un choix judicieux de points lumineux en position, en intensité et en couleur.

Le tunnel de Monjézieu, sur l'autoroute A75 dans le Centre, a fait l'objet d'expérimentations à base de produits lumineux divers (photo 4). Une idée était de renforcer la signalisation des niches de sécurité par un cadre en bandes rétro réfléchissantes. Les surfaces traitées, étant dans un plan parallèle à l'axe de vision des conducteurs, ne sont pas très bien perçues.

Un autre essai a consisté à peindre un cadre en peinture fluorescente autour des motifs triangulaires destinés à annoncer les niches de sécurité. L'efficacité n'est pas bonne pour la raison évoquée précédemment. Si les surfaces traitées étaient en relief par rapport au piédroit dans un plan perpendiculaire au sens de circulation, ces systèmes fonctionneraient correctement.

Un autre équipement à base de fibres optiques a été testé. Il permet d'avoir toutes sortes de clignotements et de couleurs de points lumineux. Mais il est relativement cher et il n'est pas question de transformer une niche de sécurité en sapin de Noël.

■ UTILISATION DU RELIEF

L'utilisation du relief est plus difficile à mettre en œuvre. Dans les tunnels d'Aiguebelle et des Hurlières sur l'autoroute A43 en Savoie, les niches comportent un habillage solide en excroissance par rapport au piédroit. La signalisation du poste d'appel d'urgence et de l'extincteur a été intégrée aux parois verticales de forme galbée à la manière des panneaux de signalisation éclairés de l'intérieur. Ce type d'habillage ne doit pas empiéter sur la largeur disponible du trottoir nécessaire au cheminement des piétons. Il doit pouvoir se briser en cas de choc par un véhicule pour ne pas créer un danger.

■ LIMITES

Maintenance et renouvellement

Tous les dispositifs décrits doivent être entretenus. Les motifs ou fresques sur les piédroits doivent

être nettoyés pour retrouver leur aspect originel. Il ne sert à rien de prévoir, à grand frais, une animation si elle est cachée par la salissure. Si des dégradations (décollement de la peinture des motifs par exemple) apparaissent, il faut y remédier sinon on s'expose à des critiques.

La remise en peinture d'un tunnel ou le changement du revêtement de ses piédroits est l'occasion de repenser l'animation en fonction des derniers développements. Les dispositifs à base d'éclairage doivent être maintenus au même titre que l'éclairage ordinaire du tunnel.



Photo 4
Expérimentations
dans le tunnel
de Monjézieu

*Experiments in the
Monjézieu tunnel*

Photo Cetu

Effets indésirables

Il ne faut pas que l'animation perturbe l'attention des usagers ou provoque des effets indésirables. Il ne doit pas y avoir de confusion entre la signalisation réglementaire et l'animation tant sur le plan de la couleur que des formes. L'utilisation des couleurs verte, rouge et orange de la signalisation verticale fera l'objet d'attentions particulières.

L'attention de l'utilisateur ne doit pas être détournée au point de lui faire oublier la sécurité routière. Une animation trop compliquée alors que le trafic est intense et la vitesse pratiquée élevée peut engendrer, pendant quelques secondes, un détournement d'attention pour le décryptage de la scène visionnée.

L'animation ne doit pas provoquer de malaises chez les usagers. Cela est à l'opposé de l'effet recherché mais cela peut se produire bien involontairement. La variation à une certaine fréquence de zones de lumière et d'ombre provoquée par des motifs répétitifs (effet *flicker*) peut entraîner, chez certains usagers sensibles, des troubles comme une crise d'épilepsie ou une certaine somnolence. Il a été rapporté que le motif linéaire peint qui ondule de manière continue sur les 950 mètres du tunnel du Pas de l'Escalette sur l'autoroute A75 dans le centre de la France a provoqué une sorte de mal de mer chez certains usagers.

Il est inutile de prévoir une composition sophistiquée à base de couleurs variées si l'éclairage



est réalisé avec des sources sodium basse pression. La lumière jaune qu'elles fournissent ne permet pas de distinguer les couleurs et tout apparaît dans une gamme de gris sans grand intérêt. Le projet d'animation doit donc être étudié en liaison avec le projet d'éclairage général du tunnel.

■ ÉVALUATION

La plus grande critique que l'on peut faire à l'animation est que ses bénéfices tant sur le plan de la sécurité que sur le plan du confort n'ont jamais été évalués.

En France, une enquête est réalisée chaque année pour connaître le niveau de satisfaction de l'utilisateur utilisant le réseau routier national [8]. Dans un premier temps, pour l'année 1999, il est envisagé de greffer sur le questionnaire général, un questionnaire complémentaire relatif aux tunnels routiers.

Une enquête spécifique aux tunnels routiers est projetée ultérieurement. Elle viserait à connaître la perception des conducteurs au cours de leur passage en tunnel et leurs attentes quant à l'amélioration des conditions rencontrées. Les sites de tunnels à explorer devraient être choisis de manière à être particulièrement représentatifs (urbain, rase campagne, montagne, court, long).

Ce genre d'études a été effectué à l'occasion de la mise en service du tunnel du Gothard (le plus long tunnel routier au monde avec 17 km) ou en Norvège où il y a de très nombreux tunnels [9]. Les résultats montrent que les usagers habitués sont plus détendus que ceux qui traversent un tunnel pour la première fois. Les usagers souhaitent des tunnels plus éclairés, plus larges avec des piédroits clairs. Les tunnels sombres et étroits engendrent une sensation de malaise.

■ ÉTUDE D'UN PROJET

Différentes professions – généralement en association – peuvent être sollicitées pour réaliser un projet d'animation : architecte, paysagiste, graphiste, coloriste, éclairagiste, concepteur lumière. Des psychologues peuvent être appelés en renfort. La plupart du temps, le projet est concrétisé par des dessins. Des essais sont quelquefois effectués pour avoir une idée concrète du résultat du projet imaginé. C'est moins difficile avec un éclairage que l'on peut installer et enlever par la suite. Il est nécessaire que tout soit bien préparé à l'avance. Cela a été réalisé dans le premier tube du tunnel de Chamoise sur l'autoroute A40 entre Lyon et Genève dont la rénovation de la peinture doit s'accompagner de la mise en place d'un éclairage spécial des dispositifs de sécurité.

Le comportement des usagers dans les longs tun-

nels à gabarit réduit de 2 m sur l'autoroute A86 en projet à l'ouest de Paris est difficile à prévoir [10]. Aussi, une maquette de tunnel grandeur nature a été conçue sur 30 m de long. Le fond est peint en trompe-l'œil et il est possible de s'installer dans des voitures stationnées dans la maquette pour se rendre compte de l'ambiance.

Les possibilités des dessins ou maquettes sont limitées et rendent imparfaitement compte de ce que peut ressentir l'utilisateur à une certaine vitesse. Pour pallier cet inconvénient, on peut faire appel aux nouvelles possibilités de la vidéo et de l'informatique afin de mettre au point un outil interactif. Tout d'abord, un film vidéo numérisé de l'ensemble du tunnel est réalisé. On incruste alors dans les images les motifs à visualiser. La nouvelle vidéo ainsi préparée est soumise à des observateurs chargés de donner leur avis. Il est possible de faire varier la vitesse du véhicule traversant le tunnel ou de le faire circuler sur la voie lente ou rapide.

Une étape supplémentaire doit pouvoir être franchie avec le simulateur de conduite mais le système a encore besoin d'être perfectionné [11,12,13].

■ CONCLUSION

L'architecture intérieure des tunnels est passée dans une phase opérationnelle avec les très nombreuses animations réalisées à ce jour.

Et dans ce domaine, les idées ne manquent pas pour mieux utiliser la peinture sur les piédroits, les jeux de lumière et les possibilités de la mise en relief.

Dans l'avenir, il reste à évaluer leur influence sur l'amélioration de la sécurité et leur impact sur le confort et l'agrément des usagers.

■ BIBLIOGRAPHIE

- [1] Marec, M. 1994. "Comment rendre agréable l'ambiance intérieure d'un tunnel routier" - *Revue générale des routes et aérodromes* - N° 723, novembre 1994, pp. 17-20.
- [2] Vincendon, S. 1996. "Mélodie urbaine en sous-sol" - *Libération* - 6 octobre 1996, p. 24.
- [3] E.,L. 1996. "Une sécurité soignée pour les tunnels" - *Circuler* - Mai-Juin 1996, pp. 24-25.
- [4] Houlet, J. 1997. "De la couleur des ponts" - *Revue générale des routes et aérodromes* - N° 749, mars 1997, pp. 57-62.
- [5] Hemerijckx, E. 1996. "Parachèvement des stations de prémétro - Tronçon de prémétro Astrid - Sport à Anvers" - *Tunnels et ouvrages souterrains* - N° 138 - Nov./déc. 1996, pp. 349-353.
- [6] Cetu, 1991. "Architecture des têtes de tunnels" - *Centre d'Études des Tunnels* - Juillet 1991 - 92 pages.

[7] Bondil, R. et Bigazzi, M. 1990. "Contournement autoroutier de Nice, traitement des tunnels en site urbain" *Tunnels et ouvrages souterrains* - N° 100 - Juillet/août 1990, pp. 203-207.

[8] Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, direction des Routes, 1998. "Les usagers ont la parole - Baromètre de satisfaction du réseau routier national" - Mars 1998, 16 pages.

[9] Grønhaug, A. 1997. "Road tunnel linings - Design for safety, comfort and aesthetics" - *Nordic road and transport research* - N° 3 - 1997, pp. 4-6.

[10] Centre d'études des tunnels. 1995. "Recommandations pour la conception des tunnels urbains à gabarit réduit, RECTUR" - Septembre 1995, pp. 82-83.

[11] - Lidström, M. 1998. "Using an advanced driving simulator as a design tool in road tunnel design". *Transportation Research Board - 77th Annual meeting* - January 11-15, 1998, Washington D.C., 9 pages.

[12] Törnros, J. 1998. "Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel - A validation study" - *VTI Särtryck* - 301, 1998, pp. 497-503.

[13] Bowers, K. H. and al. 1997. "Limited facility tunnels (and bridges)". *Transport Research Laboratory* - TRL, UK, PR/CE/183/97.

Cet article a été publié en langue anglaise sous le titre : *Interior architectural treatment of road tunnels in France*, par Michel Pérard, lors du congrès "Accessibility and aesthetics for tunnels and urban underground space" qui s'est déroulé à Bâle les 9 et 10 décembre 1998.

ABSTRACT

Architectural treatment inside road tunnels in France

M. Pérard

The interior of tunnels is receiving architectural treatment today in France in order to meet two main objectives :

- improve safety : faster and convenient location of different safety and signing devices in certain dangerous portions ;
- improve comfort : decoration on piers, for example.

The designer has many possibilities depending on the desired effect :

- motifs,
- lighting,
- relief.

The article analyses the objectives of the architectural treatment of tunnel interiors, describes the evolution of the different projects completed in France and shows the pitfalls to be avoided.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die architektonische Bearbeitung des Innenausbaus der Straßentunnel in Frankreich

M. Pérard

Die architektonische Bearbeitung des Innenausbaus der französischen Straßentunnel entspricht heute im wesentlichen einer zweifachen Aufgabenstellung :

- Verbesserung der Verkehrssicherheit : schnelleres und leichteres Erkennen der verschiedenen Sicherheitsvorrichtungen und hervorhebende Signalisierung bestimmter gefährlicher Abschnitte ;
- Verbesserung des Komforts der Verkehrsteilnehmer : z.B. Dekoration der Seitenwände.

Der Planer verfügt je nach der gewünschten Wirkung über mehrere Möglichkeiten :

- Motive ;
- Beleuchtung ;
- Relief.

Im vorliegenden Artikel werden die Zielsetzungen der architektonischen Bearbeitung des Innenausbaus der Tunnel analysiert, die Entwicklungen der verschiedenen französischen Methoden in der jüngsten Vergangenheit beschrieben und einige vermeidbare Problematiken aufgezeigt.

RESUMEN ESPAÑOL

La integración arquitectónica del interior de los túneles viarios en Francia

M. Pérard

En la actualidad se asiste en Francia a una integración arquitectónica del interior de los túneles para responder a dos objetivos principales :

- mejorar la seguridad : localización más rápida y cómoda de los distintos dispositivos de seguridad y señalizaciones al tratarse de ciertas secciones peligrosas ;
- mejorar el confort : decoración de los pies derechos, por ejemplo.

El proyectista dispone de varias soluciones según el efecto que se trata de obtener :

- los motivos ;
- la iluminación ;
- el relieve.

Se analizan en este artículo los objetivos de la integración arquitectónica del interior de los túneles, y se describe la evolución de distintas obras francesas similares y recientes y, finalmente, se indican los escollos que se trata de evitar.

Le viaduc du Scardon

Contournement d'Abbeville

Le viaduc du Scardon, d'une longueur totale de 1022 mètres permet à l'autoroute A16 de contourner l'agglomération d'Abbeville en franchissant, à 35 mètres de hauteur, un site protégé très sensible. Ceci a imposé, tout au long de la réalisation, la prise de précautions très particulières. Attribué à l'entreprise Razel suite à un concours conception-réalisation lancé par la Sanef (maître d'ouvrage) et Scetauroute (maître d'œuvre), l'ouvrage réalisé se compose d'un tablier de 19,20 mètres de largeur, dont la section transversale est constituée par un caisson en béton précontraint de 3,50 mètres de hauteur, à deux âmes verticales et d'encorbellements soutenus par des bracons. La portée courante est de 50,40 mètres et le tablier a été mis en place par poussage d'un seul côté par tronçons successifs de 25,20 mètres.

Photo 1
Photomontage
du projet retenu, présenté
lors de la remise des offres

Photomontage of adopted design
scheme, presented during
the presentation of bids

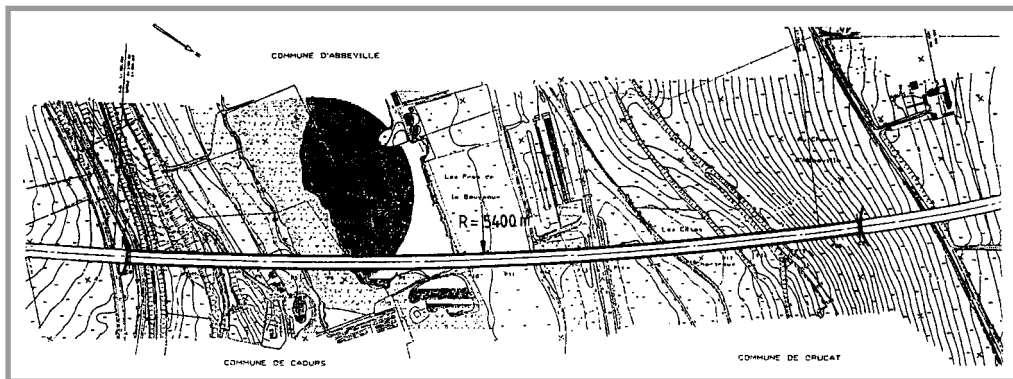


Figure 1
Vue en plan de l'ouvrage
Plan view of structure

Contournant l'agglomération d'Abbeville par l'est, l'autoroute A16, qui doit relier Paris à Calais, via Amiens et Boulogne, franchit la vallée du Scardon, perpendiculairement à son axe, par un grand viaduc d'un peu plus de 1000 m de longueur.

Le fond de la vallée, situé à 35 m environ en dessous de la plate-forme autoroutière, est parcouru par trois rivières, le Scardon, la Drucat et l'Hermitage, deux routes départementales, une voie ferrée désaffectée, des étangs, des bosquets et une exploitation piscicole.

ment altérés en surface et recouverts sur une épaisseur plus ou moins importante d'alluvions et de tourbes, la craie saine étant atteinte, au plus profond, à environ une vingtaine de mètres sous la surface du sol, en partie centrale de la vallée.

Afin de définir la conception générale de l'ouvrage, mais aussi son architecture et ses techniques de réalisation, la Sanef a eu recours à une procédure originale, consistant à lancer un concours conception-réalisation, ce qui a permis d'allier la créativité et le talent des entreprises à la concertation avec les populations directement concernées par l'ouvrage.

LE CONCOURS

Dans un premier temps, la Sanef a publié un avis de concours ouvert à des groupements constitués d'une ou plusieurs entreprises, d'un bureau d'études techniques et d'un architecte. Après examen des candidatures, dix groupements ont été retenus pour participer au concours portant sur la conception et la réalisation de l'ouvrage. Ce concours s'est déroulé en deux phases, sous la surveillance d'une commission technique et sous l'autorité d'un jury. La commission technique était composée de la Sanef maître d'ouvrage, de Scetauroute, maître d'œuvre, de spécialistes des ouvrages d'art de Jean Muller International (J.M.I.), du ministère de l'Équipement, ainsi que de l'architecte conseiller de la Sanef en matière d'architecture et de paysages.

Le jury, présidé par le président de la Sanef, était composé de représentants de la Sanef et de Scetauroute, des maires des communes concernées, de représentants du ministère de l'Équipement, de l'architecte conseil pour le département de la Somme et de l'architecte expert de l'État pour l'autoroute A16, Amiens-Boulogne.

Le règlement du concours précisait les contraintes du projet (tracé, profil en long, environnement) et les exigences du maître d'ouvrage en matière d'exploitation de l'ouvrage et de respect de l'environnement.

Dans ce cadre, les candidats avaient toute liberté de propositions techniques leur permettant d'optimiser le tripôle coûts-délais-qualité – en particulier aucune traverse n'avait été imposée.

Première phase

Les groupements retenus pour participer à ce concours, disposaient, pour effectuer les études

par l'autoroute A16

de conception correspondant à la première phase, d'environ six mois. Chaque candidat pouvait, dans le cadre de cette première phase, proposer deux projets.

Un groupement n'ayant remis qu'une seule proposition, le jury a donc examiné et a dû se prononcer sur dix-neuf projets proposés. La procédure d'examen des offres s'est déroulée de la façon suivante :

- ◆ remise des projets par les groupements concourant ;
- ◆ examen des offres par la commission technique, qui établit un premier rapport ;
- ◆ examen des offres par le jury, qui a connaissance du rapport de la commission technique ;
- ◆ choix des projets admis à concourir au second tour.

À l'issue de cette première phase, trois projets ont été retenus, et invités à se présenter à la seconde phase.

Sur ces trois projets retenus, deux comportaient des tabliers en ossature mixte et un comportait un tablier entièrement en béton.

Ces trois projets ont alors fait l'objet d'études complémentaires par les groupements concernés, répondant aux observations et aux questions formulées par la commission technique et le jury.

Deuxième phase

La procédure, pour cette seconde étape a été la suivante :

- ◆ études détaillées des projets retenus, complétées par les réponses aux questions posées ;
- ◆ examen des offres par la commission technique ;
- ◆ examen des offres par le jury ;
- ◆ choix du lauréat.

La durée de cette seconde phase d'études, dont le niveau de précision devait correspondre sensiblement à un A.P.D., et qui devait permettre l'établissement d'un A.P.O.A., a été d'environ cinq mois. Les principaux critères de jugement, qui ont présidé au choix final du jury, ont été les suivants :

- ◆ qualité technique du projet ;
- ◆ dispositions assurant la qualité de la réalisation et la sécurité ;
- ◆ bonne insertion dans le site ;
- ◆ respect du site sur le plan paysager et environnemental ;
- ◆ valeur architecturale de l'ouvrage ;
- ◆ coût de l'ouvrage.

Le projet qui a été déclaré lauréat du concours est le projet présenté par le groupement comprenant

l'entreprise Razel, mandataire du groupement, assisté de J.-V. Berlottier, architecte, et de J. Tonello, ingénieur conseil. Le jury a particulièrement apprécié dans ce projet la maîtrise des travaux de fondation de l'ouvrage, la cohérence d'ensemble du projet, ainsi que l'élégance générale de l'ouvrage (photo 1).

LE PROJET RETENU

La solution proposée comporte un tablier unique en béton précontraint de 1022 m de longueur totale, 19,20 m de largeur, constitué d'une poutre caisson de hauteur constante égale à 3,50 m et comportant 21 travées dont 18 de portée égale à 50,40 m, une travée de transition de 43,20 m et deux travées de rive de 36,00 m. L'axe en plan de

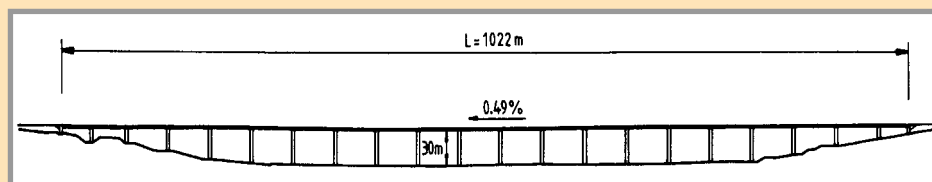


Figure 2
Coupe longitudinale de l'ouvrage
Longitudinal section of structure

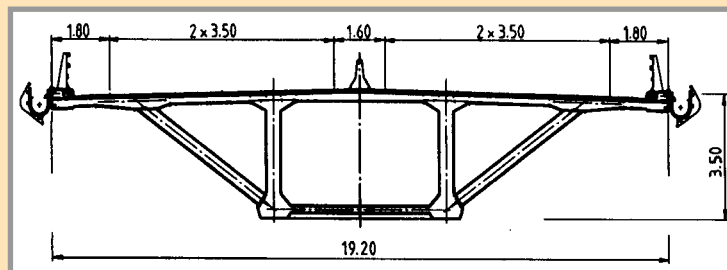


Figure 3
Coupe transversale courante du tablier
Current cross section of deck

l'ouvrage est un cercle de rayon 5400 m et son profil en long est une pente constante de 0,49 % (figures 1 et 2).

Le tablier est formé d'un monocaisson à deux âmes verticales avec des bracons latéraux parallèles préfabriqués en béton, placés tous les 3,60 m et supportant de larges encorbellements (figure 3).

Le tablier est mis en place par poussage d'un seul côté ; chaque tronçon, d'une longueur de 25,20 m, étant préfabriqué en deux phases successives, le U inférieur et le hourdis supérieur, avant d'être poussé sur les piles par l'intermédiaire d'appuis en glissant sur des plaques en acier inoxydable, avec interposition de patins en téflon.

Bernard Cathelain
DIRECTEUR DE LA CONSTRUCTION
Sanef

Jean-Luc Sauvageon
DIRECTEUR DE PROJET
Scetauroute

Jean-Claude Dufaut
CHEF DE LA DIVISION TRAVAUX
Scetauroute

Jean Georges
CHEF DE PROJET ÉTUDES
Scetauroute

Marc Novarin
CHEF DE PROJET
Jean Muller International

Paul Aublanc
DIRECTEUR GRANDS TRAVAUX
Razel

Yannick Jeanjean
DIRECTEUR DU CHANTIER
Razel

Michel Placidi
DIRECTEUR TECHNIQUE
Razel

Dominique Regallet
INGÉNIEUR EN CHEF ÉTUDES
Razel



Photo 3
Coffrage des fûts de pile en partie courante par levées de 4,00 m

Shuttering of pier shafts in the current part by rises of 4,00 m



Photo 2
Vibrofonçage des pieux HP à l'intérieur du batardeau, à gauche l'estacade d'accès

Vibration sinking of HP piers inside the cofferdam, on the left of the access platform



Photo 4
Coffrage outil spécifique des chevêtres en tête des piles

Shuttering with specific tool for pier head

■ LES FONDATIONS

Les deux culées d'extrémité de l'ouvrage, et la pile de rive côté sud, placées en tête des talus bordant la vallée, sont fondées sur des semelles superficielles en béton armé reposant directement sur la craie affleurante.

Toutes les autres piles sont encastrées sur des fondations profondes traversant les couches tourbeuses superficielles et ancrées dans la craie sous-jacente. Compte tenu de la grande sensibilité de ce site à l'environnement, mais aussi à la teneur en eau des craies, Razel a, en collaboration avec le LCPC, mis au point une technique particulière de fondation, consistant à mettre en œuvre par vibrofonçage des pieux métalliques de type HP, platinés en pointe, et enrobés de mortier au fur et à mesure de leur descente.

Chaque fût de pile repose sur une semelle rectangulaire en béton armé de 8,40 x 6,20 m et de 1,50 m d'épaisseur, prenant appui sur 32 pieux métalliques dont la longueur varie de 8,00 m à 27,00 m et dont le poids au mètre varie de 79 à 110 kg.

Pour les trois piles situées dans l'étang, réalisées à l'intérieur de batardeaux en palplanches métalliques, une estacade de 180 m de longueur a été réalisée pour permettre la circulation des engins et le transport des matériaux sans détruire l'environnement du bord de l'étang (photo 2).

■ LES APPUIS

En coupe transversale, les fûts de pile ont, sur la plus grande partie de leur hauteur, une section elliptique constante de 5,00 m de grand axe et de

3,50 m de petit axe. Ils sont élégis et la paroi périphérique a une épaisseur de 40 cm.

En partie supérieure, le fût s'épanouit en un chevêtre composé de deux branches de 7,00 m de hauteur, chaque branche ayant, en section horizontale une forme semi-elliptique pleine qui se développe verticalement suivant un arc de cercle. L'écartement entre les deux branches est maintenu par trois tirants en béton, le plus haut étant précontraint. Pour la plupart des piles, situées en partie centrale de la vallée, la hauteur du dessus de la semelle au-dessus du chevêtre est de 32 m. Le fût de pile, en partie courante, est réalisé en levées de 4,00 m de hauteur, dans un coffrage grimpeur spécifique, conçu comme une coque autostable, sans tige traversante (photo 3).

Le chevêtre est réalisé, compte tenu de sa hauteur de 7,00 m, en deux levées de bétonnage dans un coffrage outil spécifique régnant sur toute la hauteur de l'épanouissement, les trois bracons reliant les deux branches étant préalablement préfabriqués (photo 4).

Une grue à tour à montage rapide dessert deux piles contiguës (photo 5).

■ LE TABLIER

L'ensemble du tablier est préfabriqué sur une aire située en arrière de la culée nord, et comprenant de l'arrière vers l'avant, respectivement quatre zones de travail :

◆ zone 1 : construction (coffrage, ferrailage et bétonnage) du hourdis inférieur et des âmes du caisson, ainsi que des renforcements au droit des entretoises sur piles et des déviateurs de précontrainte ;

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Surface du tablier : 19640 m²

Bétons

- Semelles : 1 600 m³
- Piles et culées : 4 300 m³
- Tablier : 10 410 m³ (épaisseur moyenne : e = 0,53 m)

Aciers passifs

- Appuis : 710 t
- Tablier : 1610 t (soit 154 kg/m³)

Aciers durs

- Précontrainte transversale (4T15) : 77 t soit : 4,0 kg/m²
- Précontrainte longitudinale de poussage (dont précontrainte provisoire) : 338 t soit : 32,5 kg/m³
- Précontrainte longitudinale définitive (12 et 19T15) : 173 t soit : 17,0 kg/m³

Durée totale du chantier : 24 mois, de juillet 1995 à juin 1997



Photo 6
Vue d'ensemble de l'aire
de préfabrication du tablier
Overall view of deck precasting area

Photo 7
Le tablier en cours de poussage
The deck during pushing



Photo 5
Ensemble du chantier des appuis :
au premier plan, coffrage grimpant des fûts
de pile, au second plan coffrage outil
des chevêtres et desserte par grue à tour
à montage rapide

Overall view of worksite : in foreground,
the travelling formwork of the pier shafts ;
in the background, shuttering of pier heads
and service by fast-erection tower crane



Photo 8
Le tablier en cours de poussage, au moment
de l'accostage de l'avant-bec sur une pile

The deck during pushing, as the cutwater
is approached to a pier

◆ zone 2 : mise en place des bracons latéraux préalablement préfabriqués et construction (coffrage, ferrillage et bétonnage) du hourdis supérieur ;

◆ zone 3 : mise en œuvre suivant un phasage précis de la précontrainte transversale et de la précontrainte longitudinale nécessaire au poussage (une partie de la précontrainte définitive – câbles intérieurs au béton – et la précontrainte provisoire antagoniste – câbles extérieurs au béton) ;

◆ zone 4 : zone de transition, avant d'atteindre les premières travées, dans laquelle sont effectuées les opérations de finition, l'exécution des relevés sous BN4, et la pose de ces dernières, assurant ainsi la sécurité du personnel sur le tablier pendant le poussage.

Une étude paramétrique comparative a permis d'optimiser le positionnement de l'aire de préfabrication par rapport à la culée, c'est-à-dire la longueur des zones 3 et 4, de façon à – d'une part avoir des positions du tablier en fin de chaque phase de poussage limitant les sollicitations de flexion dans la console avant (ceci afin de réduire au minimum les risques de fluage du béton en cours de construction) –, et d'autre part pouvoir générer un câblage de poussage formé de câbles longs (deux travées, soit 100 m en moyenne) ceci se traduisant par une économie sensible sur les ancrages et une diminution importante du nombre de mises en tension lors de chaque cycle (le quart de la précontrainte de poussage était mis en œuvre à chaque poussage).

Ainsi, la longueur totale de cette aire fut de 130 m, correspondant à une aire de préfabrication proprement dite (zones 1 et 2) de 50,20 m et une zone d'approche (zones 3 et 4) de 80 m.

Grâce à cette conception de la zone de préfabrication, à ce phasage de construction, au dessin spécifique du câblage, à la préfabrication très poussée des cages d'armatures et à la conception des coffrages faisant largement appel à l'hydraulique, le tronçon courant de 25,20 m de longueur a pu

être réalisé de façon quasi systématique dans un cycle de quatre jours (sans contrainte spécifique de positionnement de ces quatre jours pour disposer d'un temps de durcissement du béton afin de permettre la mise en tension des câbles de précontrainte nécessaires au poussage), ce qui représente une surface effective de tablier ainsi construit de 120 m² par jour (photo 6).

Le tablier est équipé à son extrémité avant, durant son poussage, d'un avant-bec métallique bipoutre de 32,50 m de longueur, lui permettant de franchir des travées de 50,40 m de portée. L'effort de poussage, dont l'intensité maximum n'a jamais dépassé les 1200 t prévues, était généré par deux vérins annulaires spéciaux 31 T 15 à double plateau, avec clavetages et déclavetages automatiques (photo 7).

Le guidage horizontal du tablier, en cours de poussage, était assuré par des patins en téflon sur des plaques en acier inoxydable. Compte tenu de la courbure de l'ouvrage (poussée centrifuge) et de sa longueur (1022 m), il était disposé au droit des piles et déplacé au fur et à mesure de l'avancement de l'ouvrage, de façon à avoir un guidage efficace (points d'appui les plus éloignés possible) tout en maintenant une isostaticité en plan. L'efficacité de ce dispositif fut remarquable, comme en témoigne la photo 8 dévoilant la courbure en plan de l'ouvrage.

■ LA MAÎTRISE DE L'ENVIRONNEMENT

La vallée traversée, site protégé, très sensible aux eaux de ruissellement et souterraines, comporte également la zone de captage des eaux de la commune d'Abbeville. Dans cet environnement contraignant, des mesures particulières ont été prises :

◆ transparence hydraulique de la vallée maintenue par deux ponts provisoires sur les rivières, une es-

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Sanef

Maître d'œuvre

Scetauroute

Contrôle des études

Jean Muller International (J.M.I)

Entreprise

Razel Frères (associée à J.-V. Berlotier et J. Tonello)

Études d'exécution

Razel T. & M.

Fondations profondes

EMCCF

Précontrainte

D.S.I.



Photo 9
Estacade d'accès aux batardeaux dans l'étang pour assurer la non pollution des eaux, ainsi que la protection des berges et de leur environnement

Access platform to cofferdams in the pond to prevent water pollution, and to protect the banks and their surroundings



Photo 10
Vue d'ensemble de l'ouvrage terminé
Overall view of completed structure

► tacade de franchissement de l'étang et le busage du ruisseau (photo 9);

- ◆ dispositifs d'assainissement provisoires, fossés, bassins de décantation étanches et séparateurs d'hydrocarbures en cas d'accident, tous régulièrement inspectés et entretenus;

- ◆ barrages flottants mis en place sur l'étang ainsi que sur les cours d'eau alimentant les bassins de pisciculture;

- ◆ fosses spécifiques pour le lavage et l'entretien des matériels de bétonnage à chaque extrémité de l'estacade.

Parallèlement à ces mesures, un suivi permanent de la qualité de l'eau était effectué par un laboratoire extérieur spécialisé (photo 10).

ABSTRACT

The Scardon viaduct The A16 motorway bypassing Abbeville

B. Cathelain, J.-L. Sauvageon, J.-C. Dufaut, J. Georges, M. Novarin, P. Aublanc, Y. Jeanjean, M. Placidi, D. Regallet

The Scardon viaduct, with its total length of 1,022 metres, enables the A16 motorway to bypass the town of Abbeville by crossing, at a height of 35 m, a very sensitive protected site. Throughout the construction, this called for very special precautions.

Awarded to the company Razel following a design-build competition initiated by Sanef (client) and Scetauroute (main contractor), the completed structures are composed of a deck 19,20 m long, the cross-section of which consists of a prestressed concrete box girder 3,50 m high, with two vertical webs and cantilevers supported by braces. The current span is 50,4 m and the deck was placed by pushing from one side only in successive sections of 25,20 m.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Hochbrücke von Scardon

B. Cathelain, J.-L. Sauvageon, J.-C. Dufaut, J. Georges, M. Novarin, P. Aublanc, Y. Jeanjean, M. Placidi, D. Regallet

Über die insgesamt 1022 m lange Hochbrücke von Scardon umgeht die Autobahn A16 die Ortschaft Abbeville. Das 35 m hohe Bauwerk führt über ein sehr sensibles Landschaftsschutzgebiet. Dementsprechend mußten während der gesamten Ausführung besonders ausgefeilte Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden.

Das Bauwerk wurde im Anschluß an einen von Sanef (Bauherr) und Scetauroute (Generalunternehmer) ausgeschrieben Planungs- und Bau-Wettbewerb an das Bauunternehmen Razel vergeben. Es beinhaltet eine 19,20 m breite Fahrbahntafel, deren Querbereich aus einem 3,50 m hohen Kasten aus Spannbeton mit zwei senkrechten Wänden und gestützten Auskragungen besteht. Die Spannweite beläuft sich auf 50,40 m, und die Fahrbahntafel ist in einem einseitigen Takt-schiebeverfahren mit aufeinanderfolgenden Abschnitten von je 25,20 m installiert worden.

RESUMEN ESPAÑOL

El viaducto del Scardon

B. Cathelain, J.-L. Sauvageon, J.-C. Dufaut, J. Georges, M. Novarin, P. Aublanc, Y. Jeanjean, M. Placidi y D. Regallet

El viaducto del Scardon, de una longitud total de 1022 metros, permite a la autopista A 16 el desvío de la aglomeración urbana de Abbeville salvando, a 35 metros de altura, un emplazamiento protegido sumamente sensible. Todo ello ha impuesto a lo largo de la ejecución, la necesidad de tomar precauciones sumamente particulares.

En la ejecución de esta obra atribuida a la empresa Razel a raíz de un concurso diseño-ejecución, lanzado por la Sanef (entidad contratante) y Scetauroute (director técnico), la estructura ejecutada está compuesta por un tablero de 19,20 metros de anchura, cuya sección transversal está compuesta por un cajón de hormigón pretensado de 3,50 metros de altura, con dos almas verticales y voladizos sostenidos por medio de puntales. La luz corriente entre apoyos es de 50,40 metros y el tablero ha sido instalado por un sólo lado por medio de tramos sucesivos de 25,20 metros.

Pont poussé à géométrie complexe

Cas des viaducs de l'Île Falcon en Suisse

Ce grand ouvrage fait partie de l'autoroute A9 qui de Lausanne remonte la vallée du Rhône dans le canton du Valais. Il s'agit de deux ponts réalisés par poussage cadencé, un pour chaque direction de circulation, longs d'environ 720 m chacun et poussés chaque semaine par étapes de 18,25 m. L'exécution de chaque tablier nécessite environ une année. La fin des travaux est prévue pour fin 1999. Jusqu'alors, on avait jamais exécuté des ponts par poussage d'une telle complexité géométrique, à savoir : portées variables de 27,4 m à 73,0 m, hauteur du caisson variable de 2,15 m à 3,70 m, largeur de la dalle supérieure variable de 13,15 m à 16,45 m, excentricité entre dalle supérieure et intrados du caisson pouvant atteindre le mètre. Venait de surcroît s'ajouter la difficulté que le pont, en plus de la couverture en plan, est courbe en élévation, ce qui confère un tracé hélicoïdal au caisson. Finalement, pour des raisons architecturales, le renoncement à des talons à la base du caisson ne permettait pas de centrer les réactions d'appui dans les âmes du caisson lors du poussage.

Véritable trait d'union de la mobilité entre le Haut et le Bas-Valais, l'un des cantons bilingues suisses, l'autoroute N9 Saint-Maurice – Brig devra, une fois achevée, assurer le désenclavement de toute une région géographiquement isolée. La topographie générale de la vallée façonnée au gré des facettes du Rhône n'a pas facilité la mise en place d'un transport routier rapide. Endigué aujourd'hui dans la majeure partie de la vallée, le Rhône peut encore donner libre cours à ses caprices dans la partie située entre Sierre et Loèche (photo 1). Les viaducs Île Falcon se trouvent dans la partie aval de cette zone. Partant de Sierre, l'automobiliste, dès la sortie du tunnel de Géronde, franchira par ces ponts de 720 m l'extrémité sud-ouest de la zone industrielle Île Falcon puis le Rhône.

Courant mars 1992, le département des Travaux publics du canton du Valais, par l'intermédiaire du service des Routes nationales, a décidé, en accord avec l'office fédéral des Routes d'organiser un concours de projets pour la réalisation de ces deux viaducs parallèles. Huit projets de groupements de bureaux d'ingénieurs et d'architectes ont été examinés par un jury qui a rendu son verdict en fin de l'année 1993 en décernant le 1^{er} prix aux bureaux d'études cités dans l'encadré des principaux intervenants. Après une mise au point des projets et un appel d'offres en 1995, le chantier a débuté en 1997. La mise en place par poussage cadencé du pont nord s'est achevée en avril 1998, celle du pont sud le sera en mai 1999.

Le tracé routier s'inscrit en plan dans un tracé courbe de 850 m de rayon avec, à ses extrémités, des

clothoïdes. Le profil en long présente une courbure convexe de 24'900 m de rayon. La chaussée s'abaisse vers l'ouest avec une pente de 1,34 % côté Viège et de 3,95 % côté Sierre. Un dévers unilatéral d'au maximum 7 % incline le pont vers le nord, à l'exception de la bande d'arrêt d'urgence du pont sud dotée d'une contre-pente de 3 %. Du côté de Viège, juste à l'amont du pont, une sortie d'autoroute est prévue pour le pont sud, respectivement une entrée pour le pont nord. Si cette sortie d'autoroute ne modifie que sur une petite distance la largeur de la chaussée du pont sud (de 13,15 m à 16,45 m sur une longueur de transition inférieure à 100 m), la piste d'accélération sur le pont nord concerne près de 500 m où la largeur de l'ouvrage passe de 16,45 m à 13,15 m.

A ces contraintes de tracés viennent s'ajouter des contraintes hydrauliques dictées par le maître d'ouvrage concernant le passage du Rhône, qui pouvait être franchi soit en deux portées de 100 m, soit en trois portées de 70 m environ. Notons qu'en phase de construction, des piles provisoires sont autorisées dans le lit du Rhône pour autant que l'on prenne soin de ménager un espace libre de 16 m entre les piles.

■ PROJET EXÉCUTÉ

Conception générale

Le projet primé par le jury comprend deux ponts à caisson en béton précontraint réalisés par poussage cadencé. Chaque pont est constitué de 15

Renaud Favre



PROFESSEUR - EXPERT
Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne (EPFL)

Pierre Laurencet



DOCTEUR - INGÉNIEUR
Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne (EPFL)

Photos Bernard Gardel



Photo 1
Vue générale
depuis le sud-ouest

General view
from southwest

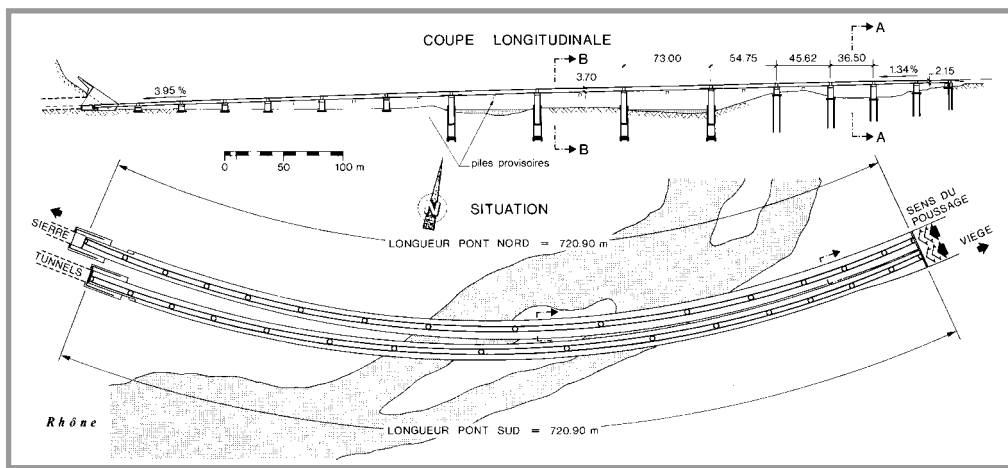


Figure 1
Situation et coupe longitudinale de l'ouvrage

Location and longitudinal section of the structure

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Longueur : 720,90 m
- Technique de construction : poussage cadencé à la descente
- Géométrie de la surface de poussage : hélicoïdale
- Poussage hebdomadaire : 18,25 m
- Longueur de l'avant-bec : 26 m
- Force de poussage maximale : 3600 kN
- Force de retenue maximale : 5400 kN
- Nombre de piles définitives : 14 par pont
- Hauteurs des piles : \approx 5 m (min) à 15 m (max)
- Dimensions des travées : 1 x 27,375 m - 6 x 36,50 m - 2 x 45,625 m, 3 x 54,75 m et 3 x 73,00 m
- Piles intermédiaires provisoires : dès que la longueur de la travée égale ou dépasse 45,625 m
- Sections en caisson : hauteur variable de 2,15 m (min) à 3,70 m (max)
- Poids de la superstructure : \approx 200 000 kN
- Elancements définitifs de l'ouvrage : 1/12 à 1/20
- Elancements provisoires de l'ouvrage : 1/10 en moyenne, 1/6 (max)
- Epaisseur moyenne de l'ouvrage : 0,76 m/m²
- Poids moyen de la précontrainte : 46 kg/m³
- Poids moyen de l'armature passive : 92 kg/m³
- Prix : 1300 CHF/m²

travées et a une longueur totale de 720,90 m (figure 1). La répartition des travées est la suivante : 1 x 27,375 m, 6 x 36,50 m, 2 x 45,625 m, 3 x 54,75 m et 3 x 73,00 m au passage du Rhône. Toutes les portées sont générées par un module de 9,125 m. Les étapes de bétonnage et de poussage de la structure correspondent à 18,25 m à l'exception des portées de 27,375 m et de 45,625 m qui nécessitent des étapes de poussage de 9,125 m. Le projet mise sur un concept clair et déroule dans la vallée un ruban continu plutôt que de mettre en évidence la traversée d'un fleuve aux rives mal définies. Les concepteurs comparent l'ouvrage à la foulée qu'adopterait progressivement un coureur pour franchir un obstacle. Soucieux de ne pas se trouver périodiquement en conflit d'un point de vue hydraulique et esthétique avec le fleuve dont le tracé fluctue avec les saisons, ils ont choisi des piles de forme circulaire, ne privilégiant aucune direction de l'écoulement de l'eau.

Les deux ponts en caisson sont supportés par 14 piles cylindriques chacune d'un diamètre de 5 m correspondant à la largeur du caisson. La plaine dénommée Île Falcon, en rive droite du Rhône, est formée par des alluvions du fleuve, constituées de graviers grossiers sableux plus ou moins limoneux. En raison de ces caractéristiques géotechniques favorables, les six piles s'y trouvant ainsi que la culée côté Sière sont fondées sur des semelles superficielles, au-dessus de la nappe phréatique. Pour éviter tout danger d'affouillement, le niveau de fondation des piles dans le Rhône doit se trouver à plus de 10 m sous le lit du Rhône, ce qui nécessite la réalisation de puits à l'aide de parois moulées orthogonales. Enfin, les piles de la rive gauche du Rhône sont fondées sur une intercalation de matériaux provenant d'éboulis, présentant par endroits des éléments de gypse susceptibles de se dissoudre. Aussi, les cinq piles en rive gauche et la culée côté Viège vont chercher appui sur des pieux à une profondeur de 15 à 20 m.

Dans le sens longitudinal, l'ouvrage ne comprend pas de joints de dilatations intermédiaires. Tous les appuis sont mobiles sauf ceux situés sur la pile à mi-franchissement du Rhône qui constitue le point fixe de l'ouvrage. Chaque paire d'appuis mobiles comprend un appui guidé longitudinalement dans la direction de l'axe du pont.

Méthode d'exécution par poussage cadencé

Afin de mieux cerner la description géométrique de l'ouvrage qui suit, il faut la mettre en relation avec le choix de la méthode d'exécution, à savoir le poussage cadencé. Celui-ci est possible pour autant que le tracé de la structure le permette. C'est le cas lorsque l'ouvrage est rectiligne. Il est également possible de choisir cette solution si l'ouvrage à pousser se trouve sur un arc de cercle ou s'il s'inscrit sur un cylindre d'axe vertical ou incliné, le long d'une hélice (c'est par exemple la géométrie d'un ressort tendu).

La géométrie de l'axe autoroutier imposé ici est compliquée puisqu'elle comprend des courbures en plan et en élévation. Dans le plan vertical, la chaussée présente un rayon de courbure de 24'900 m. En augmentant les hauteurs de la section continuellement avec les portées, l'intrados du caisson voit son rayon de courbure passer à environ 60'000 m. L'implantation précise de l'intrados a été définie à partir d'une courbe hélicoïdale d'axe incliné. Ce choix nécessite, pour garantir le tracé routier exact en plan (clothoïde - arc de cercle - clothoïde), l'introduction de dissymétries dans le sens transversal (figure 2).

Géométrie variable du tablier

La section transversale de l'ouvrage est constituée d'un caisson. Pour des raisons constructives, du fait de la hauteur variable du caisson, les âmes sont verticales d'épaisseur constante de 480 mm (figure 2). La hauteur à l'axe du caisson (h) varie continuellement de 2,15 m aux extrémités à 3,70 m en son milieu sur le Rhône. Ceci confère à l'ouvrage, en stade définitif, un élanement de 3,70/73,00 \approx 1/20 pour les grandes travées et de 3,00/36,50 \approx 1/12 pour les travées plus courtes. Au stade de poussage l'ajout de piles provisoires engendre un élanement de l'ordre de 3,70/36,50 \approx 1/10, voire de 3,70/22,81 \approx 1/6 lors du passage sur les plus courtes travées provisoires. L'intrados du caisson est horizontal dans le sens transversal (figure 2), alors que le dévers du tracé d'autoroute varie de 5,1 % à 7 %. Par conséquent les deux âmes sont de hauteurs différentes, avec une différence variable le long de l'ouvrage.

La dissymétrie la plus spectaculaire est certainement celle affectant la longueur des porte-à-faux de part et d'autre de la section. Ajouté aux variations de largeur hors tout de l'ouvrage, le tracé de l'intrados du caisson divergeant par rapport à l'axe autoroutier entraîne des variations de longueur de porte-à-faux, de 3 m à 6,4 m, exceptionnellement à presque 8 m (culée côté Viège du pont Sud). Cette fluctuation variable le long de l'ouvrage engendre des excentricités entre axes médian de la chaussée et du caisson pouvant atteindre le mètre.

A l'encastrement, l'épaisseur du porte-à-faux varie de 500 mm à 560 mm, alors que, en bout, elle varie de 250 à 310 mm. Enfin, l'épaisseur de la dalle inférieure du caisson varie de 250 mm en travées à 650 mm sur les piles des grandes travées, et son encastrement dans l'âme de 650 mm à 1 050 mm.



Vue depuis le nord-ouest, au passage du Rhône
View from northwest, where the Rhône passes

■ PRÉCONTRAINTÉ

Précontrainte transversale

La précontrainte transversale a été choisie de telle sorte qu'elle garantisse sous charges permanentes une rotation nulle du nœud liant l'âme du caisson au tablier (compensation de la rotation sous charges permanentes). Cela est rendu possible en variant de façon appropriée l'épaisseur des éléments en présence, le tracé et l'intensité de la précontrainte. Ainsi, aucun moment n'est introduit dans les âmes à l'état permanent (figure 3). Les câbles sont des unités de $P_0 = 720$ kN (4T15S) dans des gaines plates en PE.

Précontrainte longitudinale

Précontrainte de poussage

En cours de poussage le tablier est soumis à des sollicitations énormes apparaissant avec des signes positifs et négatifs. S'il n'y avait pas de précontrainte, il en résulterait des contraintes de traction très importantes qui entraîneraient la fissuration complète de l'ouvrage avant même sa mise en service. Il convient donc de réduire autant que possible ces contraintes de traction par la mise en œuvre d'une précontrainte centrée.

Dans le cas présent, cette précontrainte centrée doit permettre de garantir lors du poussage de l'ouvrage une contrainte maximale de traction n'excédant pas 1 MPa ($= 1$ N/mm²), sous poids propre et une faible surcharge de chantier de 1 kN/m². En ajoutant à ces charges l'effet des dénivellations d'appui dans le sens longitudinal et transversal pendant le poussage, cette contrainte de traction ne doit pas dépasser 3 MPa. Ces dénivellations d'appuis prennent en compte les écarts entre le niveau théorique (ou idéal) et le niveau réel provenant :

- ◆ des tolérances de bétonnage de l'intrados du caisson, w_{int} ;
 - ◆ des tolérances concernant la pose des appareils d'appuis sur les piles, w_{pos} ;
 - ◆ des tassements différentiels de la pile, w_{tass} .
- En sommant ces trois écarts possibles avec la ligne théorique de l'intrados, on obtient l'écart total entre les positions idéale et réelle du lieu des appuis. Il a été admis ici que cet écart ne devait pas dépasser longitudinalement $w_{tot} = \pm 2,5$ mm, et transversalement $w_{tot} = \pm 1$ mm. Ceci signifie que la

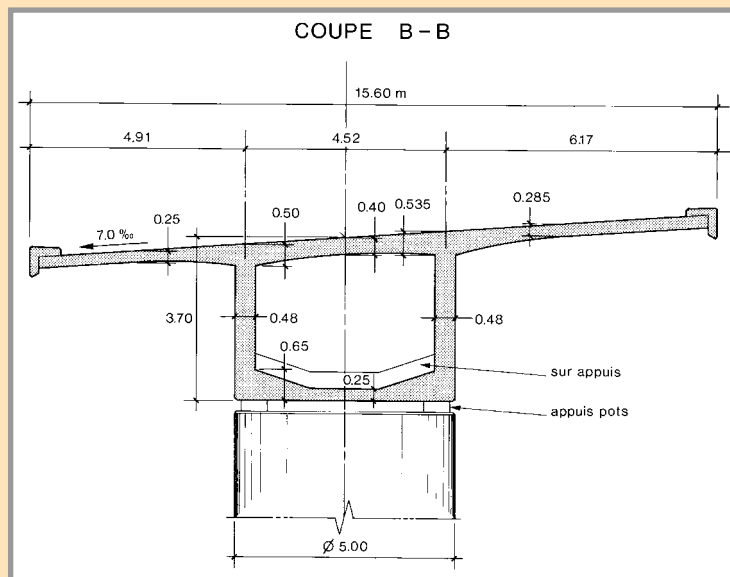
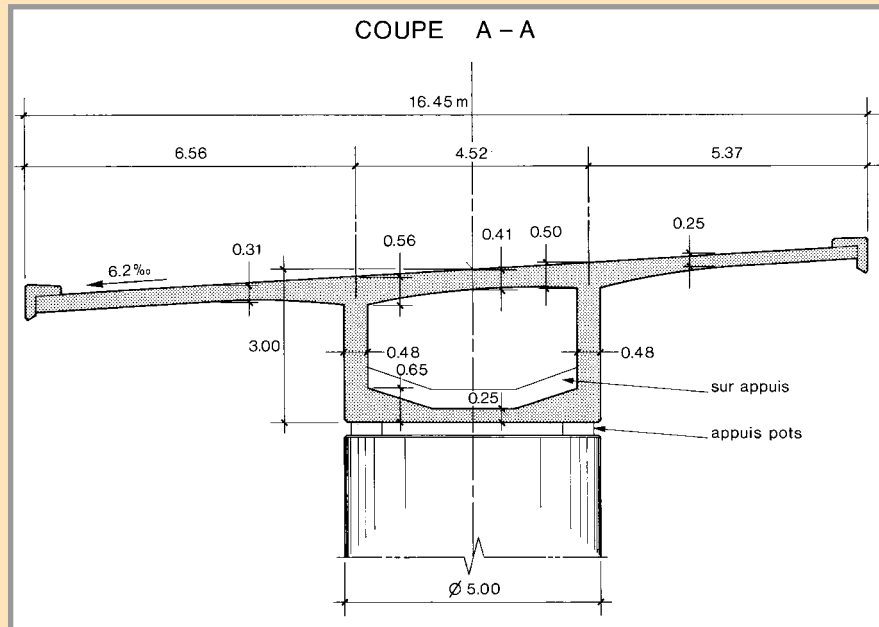


Figure 2
Sections de l'ouvrage (coupes AA et BB)
Sections of the structure (AA and BB sections)

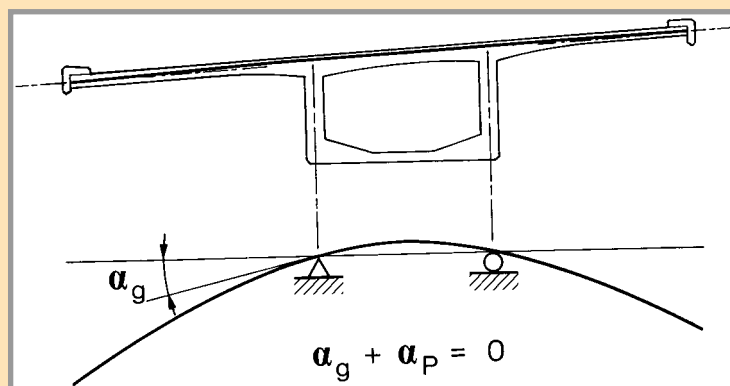


Figure 3
Compensation de la rotation sous charges permanentes grâce à la précontrainte transversale
Compensation for rotation under permanent loads thanks to transverse prestressing

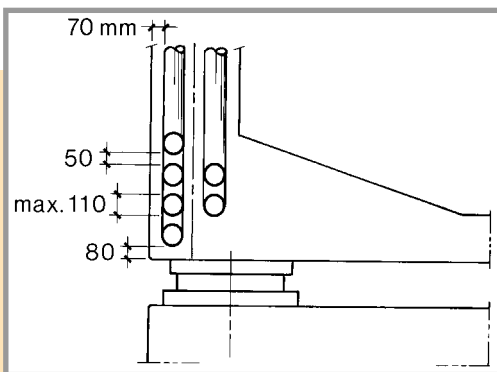
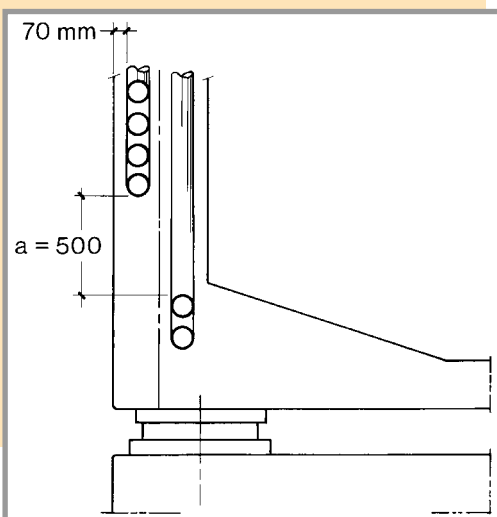


Figure 4
Disposition de la précontrainte parabolique permettant le passage sur les appuis lors du poussage. Ci-dessus : position haute - Ci-dessous : Remontée dans les âmes

Arrangement of parabolic prestressing allowing passage over the bearings during pushing operations. Up : Upper position - Down : Rise in the webs



dénivellation à prendre en compte entre deux appuis successifs dans le sens longitudinal vaut $\Delta w_{tot} = 5$ mm et, dans le sens transversal, c'est-à-dire entre deux appuis se trouvant sur la même pile, $\Delta w_{tot} = 2$ mm.

Ceci conduit à une précontrainte centrée rectiligne d'autant plus importante que la travée est petite, constituée de 16 câbles de $P_0 = 744$ kN (4T15S) à 2600 kN (14T15S).

Précontrainte en stade définitif

Afin de pouvoir balancer une part appropriée des charges permanentes, il convient de prévoir une précontrainte ondulée, dont le tracé se rapproche d'une parabole. Les auteurs du projet avaient proposé de disposer une précontrainte extérieure (extérieure au béton, c'est-à-dire dans le caisson) associée à des câbles antagonistes provisoires permettant de centrer l'effort normal de précontrainte lors du poussage. Afin de parvenir au balancement des charges permanentes souhaité en stade définitif, une précontrainte parabolique classique, noyée dans le béton des âmes, était ajoutée à la précontrainte extérieure en fin de construction. Suite à des considérations portant sur la sécurité vis-à-vis de la ruine, mais également en vue de mieux utiliser la très grande précontrainte parabolique sur les portées de 73 m d'élanement 1/20 (en noyant la précontrainte dans le béton, on augmente sensiblement la flèche des câbles), il a été décidé, à la demande du maître d'ouvrage, de noyer tous les câbles dans le béton des âmes.

La précontrainte parabolique est mise en tension lorsque le poussage de l'ouvrage a pris fin, et que le pont se trouve dans sa position définitive. Par suite de la présence des gaines encore non injectées lors du poussage, celles-ci engendrent une réduction de la résistance de l'âme vis-à-vis de l'effort tranchant et de l'introduction de la réaction d'appuis.

Soucieux de ne pas modifier l'apparence de l'ouvrage par l'ajout de talons comme c'est souvent le cas pour des ponts poussés, l'épaisseur de l'âme a dû être augmentée et les câbles paraboliques ont été disposés de telle sorte qu'ils n'affaiblissent pas trop la section et permettent un bon cheminement des efforts d'introduction entre les gaines vides (figure 4). Il existe un risque d'écrasement lorsque les gaines vides sont en partie basse et qu'elles passent sur les appuis provisoires. La contrainte due à la réaction d'appui peut alors atteindre 16 MPa. C'est la raison pour laquelle il a été évité de placer une gaine en position basse au voisinage du centre des appuis. De plus, afin de ne pas affaiblir les âmes par une concentration de gaines vides vis-à-vis de l'effort tranchant, un décalage de 500 mm a été ménagé entre les deux nappes de gaines.

L'excentricité maximale (e) entre la réaction d'appui et l'axe de l'âme a été fixée à 210 ± 40 mm.

Pour la vérification à long terme de la flèche de l'ouvrage, outre la valeur limite prescrite par la norme SIA 160 (1/700) [16], il a été choisi une valeur limite absolue de 65 mm. Cette valeur, au premier abord sévère, permet de tenir compte des simplifications de calculs, parmi lesquelles la négligence d'une fissuration de la structure provenant de sa réalisation, ainsi que de couvrir les incertitudes liées au choix du coefficient de fluage $\varphi(\infty, 90) = 1,0$ ⁽¹⁾. Soyons conscients que ces simplifications de calcul liées à la valeur limite absolue de 65 mm doivent, en réalité, permettre de garantir à long terme une flèche ne dépassant pas 100 mm ($\approx 1/700$). Il en a résulté trois à six câbles en travée et sur appuis de $P_0 = 2850$ (10T15S) à 4100 kN (22T15S) par âme.

A l'état permanent sous l'effet combiné de la précontrainte de poussage et de la précontrainte parabolique, le pont se trouve dans un état de compression avec des contraintes de compression supérieures à 1,5 MPa. Notons que la rotation maximale admise en extrémité de la travée de rive est de $\alpha = 0,15$ %, ce qui explique la forte concentration de câbles dans ces travées. En terme de compensation des déformations [1, page 47], la précontrainte assure globalement une compensation de la flèche à long terme de $\beta = 55$ %, ce qui est tout à fait raisonnable pour un pont construit par poussage cadencé où une forte précontrainte centrée permet de limiter la fissuration.

FISSURATION DE L'OUVRAGE

Lors du poussage, la contrainte maximale de traction sous l'effet du poids propre, d'une surcharge de chantier répartie, des dénivellations d'appui et de la précontrainte de poussage a été limitée à 3 MPa. Ajoutée aux contraintes provenant du bétonnage de la section en plusieurs phases, il y a des risques que la résistance à la traction du béton soit dépassée, et que le pont se trouve partiellement fissuré avant même sa mise en service. Une étude théorique et expérimentale actuellement en cours à l'EPFL traite de l'influence de la précontrainte sur la fissuration des structures en béton armé sollicitées par des actions cycliques (Laurentet [4]). Plus spécifiquement, cette étude montre l'effet bénéfique d'une compression à l'état permanent (due à la précontrainte) sur la refermeture des fissures apparues lors de la construction ou des sollicitations exceptionnelles qui surviennent pendant la durée de vie du pont. Un ouvrage correctement précontraint, même s'il risque occasionnellement de se fissurer, présente sous charges permanentes un état de compression en section, ce qui est le cas pour les viaducs Île Fal-

(1) Coefficient de fluage moyen adopté à partir d'un âge moyen du béton après poussage de 90 jours $\varphi(\infty, 90) = 1,0$

con, avec 1,5 MPa. Or, lorsqu'il s'agit de se prononcer sur la durabilité d'un ouvrage, il paraît peu raisonnable de prendre pour critère un fait exceptionnel ou survenant épisodiquement dans la vie de l'ouvrage, et il est certainement plus judicieux de considérer l'état permanent, c'est-à-dire l'état dans lequel se trouve l'ouvrage dans la grande majorité de son existence. Il faut toutefois être conscient que la répétition d'événements exceptionnels crée des dommages irréversibles qui se font ressentir à l'état permanent.

L'ouverture de fissure résiduelle est certes influencée par le taux d'armature mis en place, le diamètre des barres et les propriétés du béton. Cependant, les facteurs influençant de la façon la plus importante la valeur de l'ouverture de fissure résiduelle dans le cas de structures précontraintes sont d'une part la contrainte de compression permanente et, d'autre part, la valeur de la contrainte maximale de traction au moment d'une sollicitation exceptionnelle.

Une large étude paramétrique est synthétisée dans le tableau I. Ce tableau résume quelle est la valeur de la contrainte de compression à mettre en œuvre afin que, indépendamment des autres paramètres, l'ouverture résiduelle $w_{res, adm}$ ne soit pas dépassée sous charges permanentes. Il est valable au seul cas où l'armature passive ne s'est pas plastifiée sous sollicitations maximales.

Il ressort de l'approche très simplifiée du tableau I que l'ouverture résiduelle des fissures sous charges permanentes pour une compression de - 1,5 MPa telle que prévue dans le projet Île Falcon sera inférieure à $50 \div 75 \mu\text{m}$ ($0,05 \div 0,075 \text{ mm}$).

■ CONSTRUCTION DE LA SUPERSTRUCTURE

Généralités

L'ouvrage est poussé en 41 étapes pour chacun des deux ponts. Ces étapes se subdivisent en 38 étapes de 18,25 m et trois étapes de 9,125 m. L'ouvrage étant poussé à la descente (pente moyenne de 2,7 %), il y a lieu d'associer au dispositif de poussage un système de retenue. L'ouvrage présentant une courbure dans le plan, il faut également prévoir un système de guidage latéral. En vue de réduire les moments de console qui se présentent à l'extrémité du pont, un avant- bec de 26 m est disposé à la tête du tablier.

En phase de construction, des piles provisoires sont prévues dès que la longueur de la travée égale ou excède 45,62 m. Cela conduit à un élanement exceptionnel de $3,70/22,81 = 1/6$ lors de certaines phases du poussage, quand les sections de plus grande hauteur (3,70 m) se trouvent sur les travées provisoires de $45,62/2 = 22,81 \text{ m}$. Rappelons que l'élanement usuel d'un pont poussé



Vue depuis le sud
View from south



Appui provisoire type Freyssinet, plaque de glissement téflon
Temporary Freyssinet-type bearing, Teflon sliding plate

$w_{res, adm}$ [mm]	0.2	0.1	0.075	0.05	0.025
σ_{perm} [MPa]	≈ 0	-0.5	-1	-2	≤ -5

Tableau I
Contrainte de compression permanente σ_{perm} pour que $w_{res} \leq w_{res, adm}$ quels que soient le taux d'armature et la sollicitation maximale, sous réserve de non plastification des aciers (Laurencet [4])

Permanent compressive stress σ_{perm} so that $w_{res} \leq w_{res, adm}$ whatever the reinforcement rate and the maximum loading, provided there is no plastification of the steels

est de l'ordre de 1/14 à 1/16. Le pont de Crotoy [5] a par exemple un élanement de $55,50/3,70 = 1/15$. Un tassement différentiel entre deux piles successives, aussi petit soit-il, engendre dans la structure des efforts d'autant plus grands que sa rigidité est importante. Associé à la géométrie hélicoïdale de l'ouvrage, ce très faible élanement nécessite une grande minutie tant en ce qui concerne l'implantation du banc de fabrication que la position des têtes de piles définitives et provisoires. Afin de garantir les critères concernant le non dépassement des contraintes définies ci-dessus, les tolérances géométriques requises sont extrêmement sévères. Il convient également de prendre toutes les mesures nécessaires concernant le bétonnage de l'ouvrage sur le banc de fabrication. En effet, il est important de réduire au maximum les autocontraintes induites inévitablement par la réalisation d'une section en plusieurs étapes.

Aire de fabrication

La précision de l'implantation des aires de fabrication de l'ouvrage revêt un caractère primordial. Cette aire de fabrication est disposée au-delà de la culée Viège. Elle est fondée sur une trentaine de

Figure 5
Répercussions des imprécisions de coffrage sur l'alignement
Repercussions of shuttering imprecision on alignment

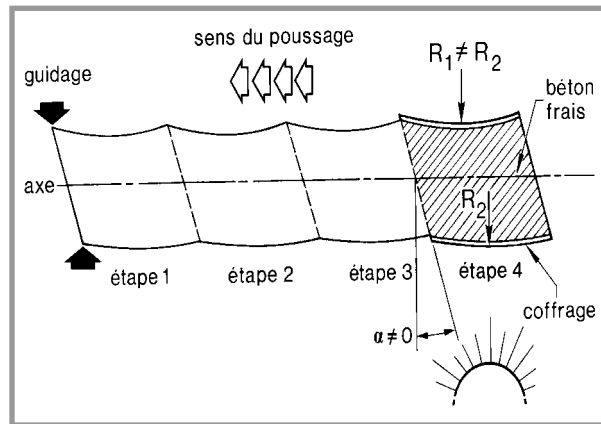


Tableau II
Composition du béton
Composition of concrete

Granulométrie	0-32, granulats roulés
Spécification	Résistant au gel
Ciment	360 kg/m ³ , CEM I 42.5 (NORMO 4)
Rapport E/C	0.43
Adjuvant	1.3 % Sikament 10 Top

Tableau III
Exigences du béton
Requirements of the concrete

Module d'élasticité moyen	30÷32 kN/mm ²
Résistance à la compression à 3 jours	30 MPa

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

- Département des transports, de l'équipement et de l'environnement du canton du Valais, service des Routes et des cours d'eau, section des Routes nationales, Valais romand
- Office fédéral des routes

Conception

Communauté d'étude pour les viaducs Île Falcon :

- SD Ingénierie Dénériaz & Pralong SA (Sion) • Bureau d'ingénieurs SA (Sierre)
- M. & S. Andenmatten (Sion)
- Vincent Mangeat SA (Nyon)

Experts

R. Favre, IBAP-EPFL (Lausanne) appuyé par :

- De Cérenville Géotechnique SA (Ecublens)
- ESM Charif & Mivelaz (St-Sulpice)

Entreprises

- Ambrosetti SA
- Zschokke SA

Sous-traitant principal

- Freyssinet SA (CH)

pieux qui permettent de garantir une assise irréprochable.

Le fait de couler en place les éléments successifs corrige automatiquement les petites erreurs de trajectoires liées aux tolérances du coffrage ($R_1 \neq R_2$, $\alpha \neq 0$, figure 5), quel que soit le tracé du pont (rectiligne ou curviligne), grâce au dispositif de guidage latéral. Cette petite correction se fait à la jointure entre le béton déjà durci et la nouvelle étape de bétonnage. Les niveaux de l'intrados et l'implantation de la dalle supérieure du caisson sont par contre entièrement tributaires de la précision du coffrage.

Bétonnage du caisson

Le béton retenu est un béton du type B45/35 au sens de la norme SIA 162 [17] (tableau II).

Par temps chaud, il est préférable d'opter pour un type de ciment à mouture plus grossière (du CEM I 32.5, Normo 3, moins exothermique), ce qui permet de réduire grandement les risques de fissuration provenant du retrait d'origine thermique (tableau III).

Poussage

Mesure des réactions verticales

Il est tenu compte des tolérances concernant le bétonnage de l'intrados du caisson, de la pose des appuis, et des tassements différentiels des piles par des dénivellations d'appuis de 5 mm dans le

sens du poussage (entre deux piles successives) et de 2 mm entre deux appuis se situant sur la même pile. Aussi, la structure doit être capable de reprendre ces différences de niveaux d'appui sans pour autant que la contrainte de traction n'excède la valeur maximale définie ci-dessus, admise à 3 MPa. Il convient cependant de vérifier lors du poussage que ces tolérances ne sont pas dépassées, auquel cas les conséquences risqueraient d'être préjudiciables à la structure. Cette vérification peut se faire de plusieurs manières. Il est possible d'équiper tous les appuis de l'ouvrage pendant le poussage de vérins dirigés en force. Ainsi, en programmant ces derniers afin qu'ils reprennent la réaction de l'appui considéré, ils vont automatiquement et instantanément compenser les éventuels tassements différentiels. Cette solution adoptée pour la construction d'un pont sur le Danube à Fischerdorf [10], bien qu'extrêmement efficace, est relativement onéreuse, et ce d'autant plus que le nombre d'appuis à instrumenter est important. La solution adoptée aux viaducs Île Falcon consiste en la mise en place sur les appuis de cellules de force permettant, à tout instant, de connaître l'effort réel transmis par l'appui. L'effort est mesuré dans l'élastomère confiné dans un appui pot. La mesure de la cellule de force est transmise à un ordinateur installé dans les baraquements de chantier sur la culée Viège via une ligne électrique (figure 6). Connaissant l'effort maximal admissible pour chacun des appuis (qui compte tenu des dénivellations d'appuis, peut dépasser de 2000 kN l'effort calculé sous poids propre seul) il est possible de réagir dès que cet effort est atteint ou dépassé par l'ajout ou la suppression d'une plaque d'acier inox entre le pont et l'appui. Lors du poussage du pont nord, des plaques de 4 mm d'épaisseur au maximum ont permis de ne pas dépasser les valeurs limites prescrites. Le mode de construction par poussage implique que toutes les sections doivent passer sur les appuis, y compris celles où les câbles de précontrainte parabolique se trouvent dans le bas des âmes, alors que les gaines ne sont pas injectées (figure 4). Afin de garantir une bonne introduction des efforts dans ces sections affaiblies, le choix s'est porté sur une solution qui utilise les appuis pots provisoires, utilisés pour les deux ponts, sur lesquels sont placés des plaques de répartition de 660 x 880 mm² permettant le passage d'une plaque sandwich en néoprène, tôle et téflon de 600 mm de large. Cela permet de garantir, lors du poussage, une contrainte de compression inférieure à 16 MPa à l'introduction de l'effort dans le caisson, et une excentricité maximum entre l'axe de l'âme et la réaction d'appui de 250 mm. Pour faciliter le poussage, les appuis pots provisoires sont positionnés dans la trajectoire du pont, c'est-à-dire avec une certaine pente, alors que les appuis pots définitifs sont scellés horizontalement, afin que la réaction d'appui soit finalement horizontale.

Dispositifs de poussage et de retenue

Le profil en long de l'ouvrage présente une très légère courbure convexe, et descend de façon générale dans la direction de Sierre. Le calcul des efforts de poussage et de retenue est basé sur une pente longitudinale moyenne de l'ouvrage de 2,7 %, et sur un poids total du pont qui vaut 200 000 kN. Deux scénarios ont été considérés : effort de poussage maximal, et effort de retenue maximal.

Pour le premier scénario, le frottement global sur les appuis glissants est choisi égal à 4 % de la charge verticale. Ainsi, la poussée des vérins pour déplacer la totalité de l'ouvrage peut être estimée à $4\% - 2,7\% = 1,3\%$ du poids du pont, à quoi il convient d'ajouter un dispositif de retenue agissant pendant le poussage avec une intensité de 0,5 % du poids propre. L'effort de poussage maximal global vaut donc 1,8 % du poids de l'ouvrage à déplacer, soit 3600 kN. Cette valeur est représentative de l'effort maximal à introduire dans les vérins lors des dernières phases de poussage. Pour disposer d'une réserve suffisante, deux vérins de poussage de 3000 kN chacun ont été mis en place.

Pour le second scénario, il est admis que le frottement est nul, et que le pont se déplace sous le seul effet de la gravité. Aussi, pour ce cas, l'effort de retenue vaut 2,7 % du poids de l'ouvrage, soit 5400 kN. Deux vérins de retenue de 4000 kN ont été mis en place.

Lors du début d'une phase de poussage, le coefficient de frottement chute très rapidement quand le pont commence à se déplacer. On peut estimer que, quasi instantanément, le coefficient de frottement passe de 4 % (frottement statique) à 1 % (frottement cinétique). Ainsi, s'il a certes toujours fallu pousser le pont pour vaincre le frottement statique en début de phase de poussage, très rapidement il a fallu le retenir. Cette inversion du signe de l'effort de poussage a été d'autant plus marquée que l'on s'approchait des dernières phases de poussage, comme prévu. En remplaçant les plaques de glissement en téflon par des plaques en bois, le frottement a été augmenté de telle sorte qu'on a dû continuer à pousser le pont, ce qui a facilité le guidage latéral.

CONCLUSIONS

L'exécution d'un pont en béton précontraint par la méthode de poussage cadencé est bien connue, généralement bien maîtrisée et économique. Il s'agit normalement de ponts de section symétrique de hauteur et largeur constante comprenant un grand nombre de travées égales. Sans appuis intermédiaires provisoires, les portées sont limitées à environ 60 m et l'élancement est d'environ 1/15. Les viaducs Île Falcon sortent radicalement de ce canevas puisque les sections sont continuellement variables en hauteur et en largeur, non symétriques

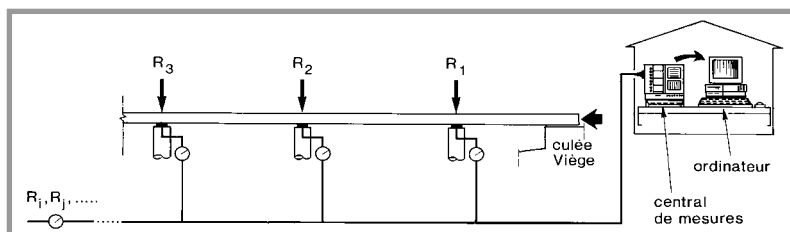


Figure 6
Surveillance
des réactions d'appui
réelles lors du poussage
*Supervision of real
bearing reactions during
pushing operations*

et que les portées varient de 27,375 à 73,00 m. En plus, les talons qui d'ordinaire débordent à la base du caisson pour permettre de centrer les réactions d'appui lors du poussage y font défaut pour des raisons de conception architecturale.

Grâce à une préparation minutieuse du projet et une qualité exemplaire de l'exécution, la réalisation des viaducs Île Falcon par poussage cadencé s'est révélée aussi favorable et qualitativement irréprochable que celle d'un pont classique conçu pour être poussé. Les mesures systématiques des réactions d'appui ont permis de les limiter à des valeurs autorisées malgré les effets perturbateurs dus aux tolérances et tassements d'appuis, en particulier dus à ceux situés sur des piles provisoires. Des excentricités de maximum 250 mm entre axes des âmes du caisson et réactions d'appui lors du poussage ont été maîtrisées sans difficultés majeures. La mise en place d'un ouvrage long de 720 m, sur un tracé courbe en plan et en élévation suivant une géométrie hélicoïdale, s'est révélée facilement maîtrisable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Favre, R., Jaccoud, J.-P., Burdet, O., Charif, H., *Traité de génie civil vol. 8, seconde édition : Dimensionnement des structures en béton - Aptitude au service et éléments de structures*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1997.
- [2] Jaccoud, J.-P. *Technologie du béton : Bases pour la spécification et la formulation des bétons en fonction des performances*, *Cours de Matériaux II* destinés aux étudiants ingénieurs en génie civil 2^e année - EPFL, Lausanne, Suisse, 1998.
- [3] Mivelaz, P., *Etanchéité des structures en béton armé - Fuites au travers d'un élément fissuré*, *Thèse de doctorat* - EPFL, Lausanne, Suisse, 1996.
- [4] Laurencet, P., *Ouvertures résiduelles des fissures suite aux actions variables dans les structures en béton*, *Thèse de doctorat* - EPFL, Lausanne, Suisse, 1999.
- [5] Beylone, R., *Ponts de Cronay, Routes et trafic*, *Article Technique n° 152*, Zürich, Suisse, mai 1998.
- [6] Mongillo, A., *Transjurane : où en sommes-nous ? Viaduc des Esserts*, *Chantiers*, Montreux, Suisse, octobre 1995.
- [7] Gillet, G., Jacquet, P., *L'ouvrage 33 sur l'autoroute A55 à Marseille*, *Annales n° 468*, France, octobre 1988.
- [8] Laruelle, C., Rossigny, P., Lasaygues, J.-C., Es-



Détail pile cylindrique/tablier
Detail of cylindrical pier/deck



Vue depuis le Nord
View from north

ABSTRACT

Complex geometry pushed bridge
Case of the viaducts of Île Falcon in Switzerland

R. Favre, P. Laurencet

This major structure forms part of the A9 motorway which rises up the valley of the Rhône from Lausanne in the Canton of Valais. It consists of two bridges, one for each direction of traffic, built by pushing and each about 720 m long. The bridges were pushed each week in decks of 18,25 m. The construction of each deck requires about a year. The works are scheduled for completion by the end of 1999. Until then, never had pushed bridges been designed with such a complex geometry, i.e. spans varying from 27,4 m to 73,0 m, box girder height varying from 2,15 m to 3,70 m, upper slab width varying from 13,15 m to 16,45 m, eccentricity between upper slab and inside of box girder reaching as much as a metre. A further difficulty was that the bridge, in addition to the cover in plan, is curved in elevation, thus giving the box girder a helical alignment. Finally, for architectural reasons, heels were not used at the base of the box girder so that it was not possible to centre the bearing reactions in the webs of the box girder during the pushing operations.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Bau einer geometrisch komplexen Brücke im Taktschiebverfahren
Die Hochbrücken der Schweizer Falcon-Inseln

R. Favre, P. Laurencet

Dieses bedeutende Bauwerk gehört zur Autobahn A9, die von Lausanne aus im Kanton Wallis das Rhône-Tal hinaufführt. Zwei Brücken werden hier im Taktschiebverfahren gebaut : je eine pro Fahrtrichtung, Länge jeweils ca. 720 m, etappenweiser Wochenschub von je 18,25 m. Der Bau einer Fahrbahntafel dauert ungefähr ein Jahr; der Abschluß der Arbeiten ist für Ende 1999 geplant. Bisher war noch nie eine Brücke mit einer solch komplexen Geometrie im Taktschiebverfahren gebaut worden : Die Spannweiten schwanken zwischen 27,4 m und 73,0 m, die Kastenhöhe zwischen 2,15 m und 3,70 m, die Breite

der oberen Platte zwischen 13,15 m und 16,45 m, und die Exzentrizität zwischen oberer Platte und Kastenlaibung kann bis zu einem Meter betragen. Hinzu kommt noch die Schwierigkeit, daß die Brücke neben dem ebenen Belag einen gekrümmten Aufriß aufweist, so daß der Kasten spiralförmig ausgelegt ist. Und aufgrund des aus architektonischen Gründen bedingten Verzichts auf Ansätze an der Kastenbasis konnte der Auflagerdruck beim Schieben nicht auf die Kästenwände zentriert werden.

RESUMEN ESPAÑOL

Puente de geometría compleja ejecutado por empuje
Casos de los viaductos de la Isla Falcon en Suiza

R. Favre y P. Laurencet

Esta importante obra forma parte de la autopista A9 que desde Lausana asciende por el valle del Ródano en el cantón del Valais. Se trata de dos puentes ejecutados por empuje, uno para cada dirección de tráfico, de una longitud de aproximadamente 720 metros cada uno, y con tramos empujados cada semana por etapas de 18,25 metros. La ejecución de cada tablero precisa, aproximadamente, un año de trabajo. El final de las obras se ha previsto para fines de 1999. Hasta entonces, no se habían ejecutado nunca puentes por empuje de semejante complejidad geométrica, a saber : luces variables de 27,4 metros a 73,0 metros, altura del cajón variable de 2,15 metros a 3,70 metros, anchura de la placa superior variable de 13,15 metros a 16,45 metros, excentricidad entre la placa superior e los intrados del cajón que puede alcanzar un metro. Se venía además a añadir la dificultad de que este puente, además de la cobertura en planta, presenta una curva en alzado, lo cual confiere un trazado helicoidal del cajón. Finalmente, por motivos arquitectónicos, la necesidad de renunciar a los talones en la base del cajón, no permitía centrar las reacciones de los apoyos en las almas del cajón en el momento del empuje.



- tibals, J.-P., Artigue, J., Thebault, C., Celdran, J., Le franchissement par l'autoroute A86 : Le viaduc de Drancy, *Travaux* n° 722, France, juillet-août 1996.
- [9] Placidi, M., Evolution des tendances des méthodes de construction des tabliers de ponts poussés, *Annales* n° 468, France, octobre 1988.
- [10] Curbach, M., Spannbeton in der Bundesrepublik Deutschland 1990-1994 : Die Vollandbrücken der Donaubrücke Fischerdorf, *Deutscher Beton-Verein* E. V., FIP Deutsche Gruppe, 1995.
- [11] Oestreicher, R., Jungbeck, H., Bulicek, H., Talbrücke über die Röslau, *Bauingenieur* 70, Allemagne, printemps 1995.
- [12] Skeet, J., Lester W., McClary, C., Incremental launch : The Stoney trail bridge, *Concrete International*, février 1998.
- [13] Charlon, P., Labailly, G., Lot 1 B – Le viaduc de la Grenette, *Chantier* n° 742, France, mai 1998.
- [14] Scientific-technical association of structural concrete, Sant Bartomeu Viaduct (New road Lleida-Girona), Prestressed concrete structures in Spain 1994-1997, *XIIIth FIP Congress & Exhibition* at Amsterdam, pp. 97-106, Madrid, 1998.
- [15] scientific-technical association of structural concrete, Barbantes Viaduct : Launched viaduct with 54-meter spans and 25.2 meter width, Prestressed concrete structures in Spain 1994-1997, *XIIIth FIP Congress & Exhibition* at Amsterdam, pp. 107-115, Madrid, 1998.
- [16] SIA 160 (Norme), Actions sur les structures porteuses, *Société Suisse des ingénieurs et architectes*, Zürich, Suisse, 1989.
- [17] SIA 162 (Norme), Ouvrages en béton, révision partielle de l'édition de 1989, *Société Suisse des ingénieurs et architectes*, Zürich, Suisse, 1993.

Le traitement des eaux et des déchets municipaux en Europe

Les perspectives de croissance du marché du traitement de l'eau et des déchets en Europe sont très importantes. Les grands intervenants français sont très bien placés pour élargir en Europe leur gamme de prestations. En disposant d'activités multiples, les grands groupes pourront mieux résister aux vagues de concentration.

Source : Crédit Lyonnais International - Direction des études industrielles du Crédit Lyonnais (Avril 1999).

■ LE MARCHÉ EUROPEEN

Un marché des déchets en forte progression

Le traitement des déchets municipaux en Europe représente 150 millions de tonnes par an et un chiffre d'affaires de près de 15 milliards d'Euros. Ce marché est en progression rapide en raison notamment des réglementations de plus en plus restrictives.

En effet, les directives européennes en matière de traitement des déchets ont suscité la promulga-

tion de lois conduisant à une protection accrue de l'environnement et à un durcissement des normes. Cependant, les lois sont loin d'être identiques dans les différents pays de l'Union. La modification des modes de traitement est progressive et entraîne des investissements importants, ce qui favorise la présence du secteur privé.

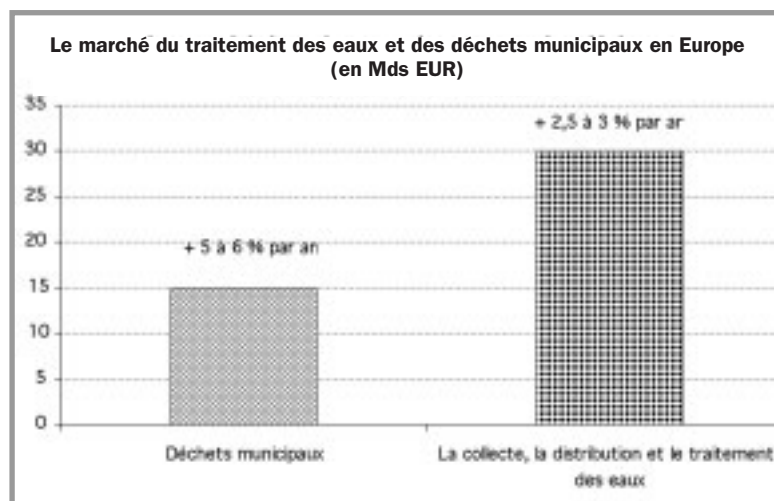
Les deux premiers groupes européens sont français, suivis d'un groupe allemand et de groupes britanniques. Les groupes américains ont tendance à se replier du marché européen.

Dans ce contexte, se développe en Europe une stratégie d'acquisitions et de partenariats et la volonté d'offrir aux collectivités publiques plusieurs services dans les secteurs de l'eau, des télécommunications, de l'électricité, du gaz...

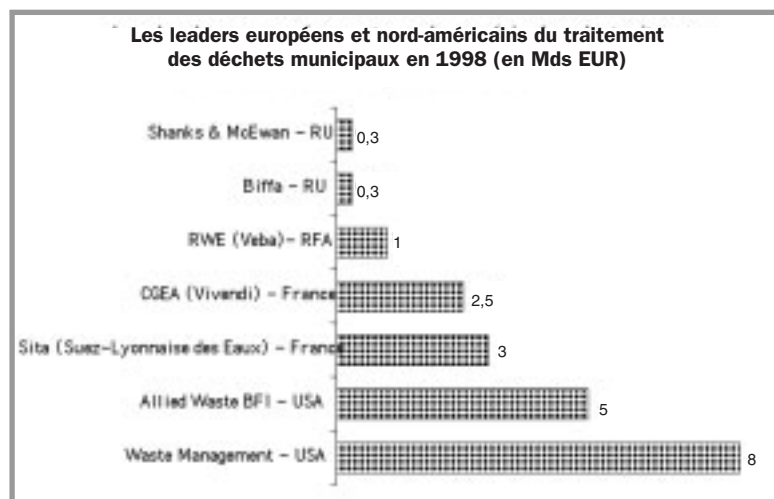
En Europe centrale, en Amérique latine et en Asie, les groupes européens cherchent à profiter des opportunités des plans de privatisation.

Croissance du marché de l'eau liée aux directives européennes

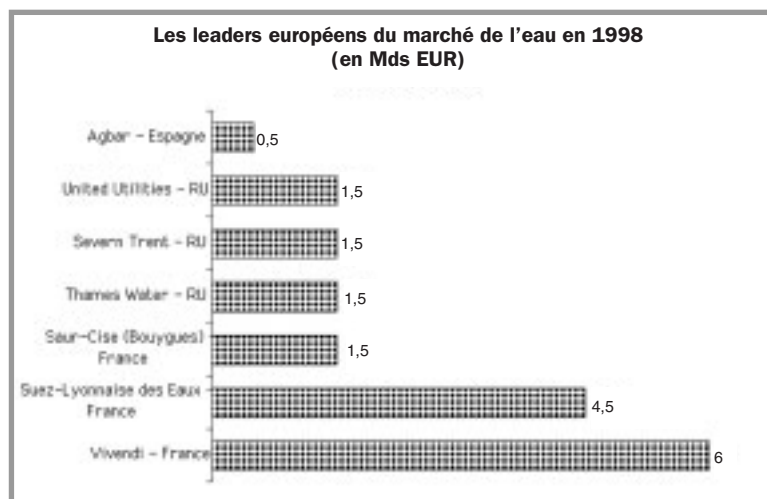
Selon les pays, la distribution d'eau diminue ou se stabilise mais, le coût de l'eau augmente en raison des investissements requis dans le domaine de l'eau par la réglementation européenne.



Source : Crédit Lyonnais International (estimations)



Source : Crédit Lyonnais International (estimations)



Source : Crédit Lyonnais International (estimations)

Des investissements importants sont nécessaires pour la collecte et le traitement de l'eau potable, la réhabilitation des réseaux de distribution ainsi que la collecte, le traitement et l'épuration des eaux usées. Le besoin de financements et de savoir-faire technique va entraîner, à un rythme probablement lent, la privatisation des services publics.

L'application des directives européennes en matière de collecte et traitement des eaux résiduaires nécessite des investissements de 60 milliards d'Euros en Allemagne, de 15 milliards d'Euros en France et de 10 milliards d'Euros en Italie.

■ LE MARCHÉ FRANÇAIS

Le marché du traitement des déchets municipaux représente 3 milliards d'Euros et enregistre une croissance annuelle de 5 à 7%. Le développement des chaînes de recyclage tout comme la réduction et le réaménagement des décharges sont favorisés par la législation.

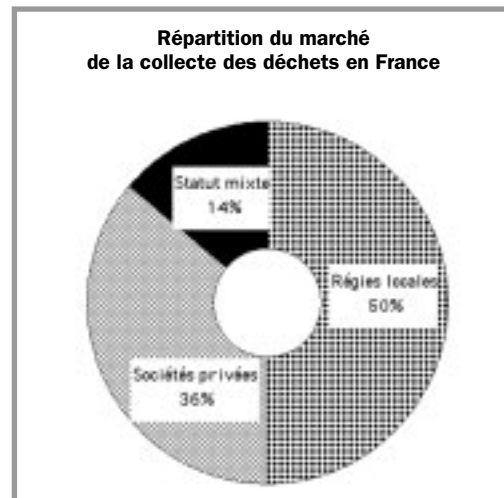
La collecte des déchets ménagers croît proportionnellement à l'achat de biens de grande consommation. A moyen et long terme, la tendance est à la diminution de la quantité des déchets collectés grâce à la progression du tri et à de nouvelles filières de collecte sélective.

Croissance élevée du marché du traitement des déchets municipaux en France

La quantité de déchets industriels ordinaires (46 millions de tonnes) devrait diminuer en liaison avec la mise en place de mécanismes de récupération et de recyclage au sein des usines. Compte tenu de nouvelles normes très strictes, de nombreuses décharges vont être fermées, ce qui va augmenter le prix de la mise en décharge.

En revanche, l'incinération qui traite actuellement 40% des déchets devrait en traiter 50% en 2005. Les installations existantes bénéficient d'augmentations de capacité. Vivendi et Lyonnaise des Eaux dominent ce marché.

Selon la loi du 13 juillet 1992, à partir du 1er juillet 2002, les décharges ne pourront accepter que les " déchets ultimes " et les déchets ménagers devront être valorisés à 75%. Ces objectifs ambitieux nécessitent des investissements évalués à 10-15 milliards d'Euros de 1992 à 2002.



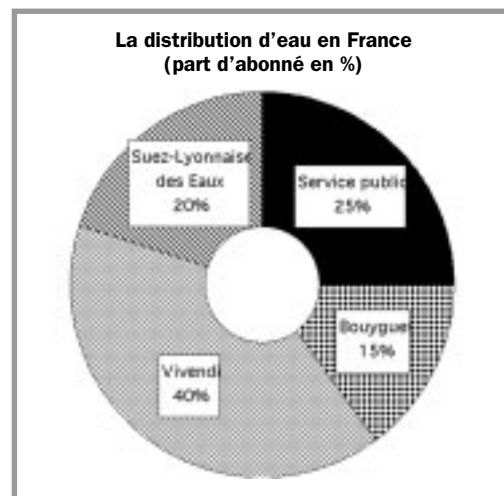
Source : Crédit Lyonnais International (estimations)

Cette réglementation entraîne une augmentation du coût de la gestion des déchets, un recours accru à la délégation au privé, un essor de l'externalisation des procédés de traitement dans le domaine industriel ainsi qu'une valorisation des décharges existantes.

Le coût de la chaîne de traitement des déchets est très variable et se situe en moyenne à 150 Euros/tonne dont 50 Euros pour la collecte et 100 Euros pour le traitement. Entre 1993 et 1998, le coût de la collecte a faiblement progressé alors que celui du traitement a beaucoup augmenté, ce qui se traduit par une hausse du coût moyen de 6 à 7%. Cette tendance devrait se confirmer entre 1998 et 2003.

Prédominance du privé dans le secteur de l'eau en France

Entre 1991 et 1996, le prix de l'eau s'est accru de 5% par an en moyenne et ce mouvement à la hausse devrait être accentué de 1996 à 2001.



Source : Crédit Lyonnais International (estimations)

Dans les grandes villes, l'augmentation du prix de l'eau est la plus forte car des investissements de modernisation des réseaux ont été réalisés et des processus de privatisation ont été engagés. Dans le prix de l'eau, la partie traitement est passé de 26% en 1985 à 35% en 1994 et devrait atteindre plus de 60% en 2005.

Le marché français de l'eau se caractérise par l'intervention de grands groupes privés (75% du marché) qui construisent les équipements et les gèrent par délégation.

Les perspectives offertes par la rénovation des réseaux de distribution d'eau sont favorables mais celles de l'assainissement sont encore meilleures car, dans ce domaine, la France a du retard. Ainsi, les Agences de l'eau ont accordé des subventions d'un montant de 10 Mds de francs en 1996 contre 4Mds de francs en 1993, ce qui reste toutefois insuffisant par rapport aux besoins. En effet, pour répondre aux nouvelles normes européenne en matière de teneur autorisée en plomb dans l'eau potable, le remplacement des anciennes conduites se chiffre à 20 Mds d'Euros.

■ LE MARCHÉ ALLEMAND

Fortes préoccupations environnementalistes en Allemagne

Le secteur des déchets municipaux allemand est le plus grand d'Europe et représente 4 Mds d'Euros. Il est largement dominé par les collectivités locales mais, la privatisation progresse.

Les Allemands ont un comportement environnementaliste et pratiquent la collecte sélective et le recyclage des déchets. D'ailleurs, la législation favorise le recyclage et l'incinération. En effet, selon la loi d'octobre 1996, à compter de 2005, toutes les ordures ménagères devront subir un traitement avant la mise en décharge.

Dans l'administration du secteur de l'eau, des associations de gestion privée jouent un rôle notable, mais ce sont les régies ou syndicats municipaux qui couvrent tous les grands services. Les villes contrôlent les usines situées sur leur territoire et les rejets polluants de celles-ci. Le bon fonctionnement de ce système explique la faible présence du secteur privé.

Par rapport au reste de l'Europe, la ressource théo-

LES GROUPES SPECIALISES DANS L'EAU (1998)

Groupe	Filiale "eau"	Chiffre d'affaires "eau"
Anglian Water	Anglian Water Services	7132 MF
Pennon Group	South West Water Services	2540,1 MF
Thames Water	Thames Water Services	10062,9 MF
Wessex Water	Wessex Water services	2442,5 MF
Yorkshire Water	Yorkshire Water Services	5373,4 MF

ment des services offerts aux municipalités plutôt que ceux proposés aux industriels. Par ailleurs, certains groupes britanniques privilégient le traitement et la mise en décharge dont les marges sont plus intéressantes que celles de la collecte.

La ressource d'eau disponible est beaucoup plus faible au Royaume-Uni (1400 m³/an /habitant) qu'en France (3600 m³/an /habitant) mais la consommation y est plus forte (331 litres/habitant/jour contre 215 en France).

Privatisation du secteur de l'eau et renforcement des participations étrangères

En 1989, la privatisation du secteur de l'eau a été lancée. Les 10 Regional Water Authorities qui étaient en charge de l'organisation de toutes les activités liées à l'eau pour une région sont devenues des Water Services Companies (WSC), responsables de la distribution de l'eau et de l'assainissement et propriétaires des installations pour 25 ans. Les WSC détiennent 75% de parts de marché. Grâce aux augmentations du prix de l'eau, les WSC ont pu investir dans des équipements de distribution et d'assainissement.

Parallèlement, les 29 Statutory Water Companies (SWC), sociétés privées exploitant des zones géographiques spécifiques ont pu conserver leur statut et ont souvent été reprises par des investisseurs étrangers, notamment français. Les SWC sont propriétaires des installations pour une période illimitée. Les SWC détiennent 25% de parts de marché.

Les WSC et les SWC ont pris la forme de SA et ont pu être introduites en bourse. A partir du 1^{er} janvier 1995, du fait du renoncement de l'État à son droit de vote sur ses actions privilégiées dans les WSC, les groupes étrangers ont pu renforcer leur participation dans ces sociétés. Plusieurs OPA, plus ou moins couronnées de succès, ont été lancées sur les WSC par des groupes étrangers. Une tendance à la concentration des différents acteurs a été observée.

Cependant, l'Écosse a conservé son système de distribution d'eau public.

Périodiquement, pour chaque compagnie, les tarifs maximaux appliqués aux clients sont fixés par un régulateur. Les nouveaux tarifs qui seront publiés à la fin de l'année devraient connaître une baisse significative de l'ordre de -15 à -20% entre 1999 et 2000-2001.

Le système britannique est très différent du système français dans la mesure où les entreprises

LES GROUPES DIVERSIFIES DANS L'ELECTRICITE ET LES DECHETS (1998)

Groupe	Filiale "eau"	Chiffre d'affaires "eau"	Diversification
Severn Trent	Severn Trent Water	9281,4 MF	Biffa
Hyder	Dwr-Cymru	6155,0 MF	Swalec
Scottish Power	Southern Water	4396,4 MF	Manweb
United Utilities	North West Water	8792,9 MF	Norweb

Source : Crédit Lyonnais International (estimations)

rique moyenne en eau disponible est peu élevée (2000 m³/habitant/an). Aussi, d'importantes actions ont été menées depuis longtemps pour diminuer les prélèvements et la pollution. Des unités vétustes ont été fermées en Allemagne de l'Est pour améliorer la qualité de l'eau.

Les communes sont libres d'adopter la forme d'organisation qu'elles souhaitent pour distribuer l'eau. Dans beaucoup de villes, des entreprises municipales regroupant, entre autres, la distribution de l'eau, du gaz et de l'électricité ont été créées.

Dans le domaine de l'assainissement et de l'épuration, de plus en plus de municipalités affirment être prêtes à transférer les activités de financement, de construction et de gestion temporaire des stations d'épuration à des entreprises privées.

Les distributeurs établissent les prix avec l'assentiment des actionnaires. Les prix reflètent assez bien la structure des coûts et leurs augmentations sont contrôlées par des organismes.

LE MARCHÉ BRITANNIQUE

Environ 100 millions de tonnes de déchets sont produites chaque année au Royaume-Uni et le marché des déchets municipaux représente 2 milliards d'Euros.

Perspectives de développement du traitement des déchets

Actuellement, environ 90% des déchets finissent à la décharge et les tarifs (20 Euros/tonne) sont plus bas qu'en France (70 Euros/tonne) et qu'en Allemagne (150 Euros/tonne) en raison de la disponibilité de nombreux sites.

L'incinération n'est pratiquement pas développée mais, l'Environment Act de 1995 a institué des règles plus strictes pour la normalisation et le contrôle des décharges. Ainsi, à moyen terme, le secteur du traitement pourrait progresser de 10% par an, une vingtaine d'usines d'incinération traitant 200 000 tonnes de déchets pourraient être construites.

Ce secteur est relativement atomisé (les 10^{èmes} entreprises représentent 35% du marché) mais, l'entrée des investisseurs étrangers, notamment français, favorise la concentration.

Avec un chiffre d'affaires de 150 millions d'Euros, Sita est leader sur ce marché et la privatisation des services de traitement et de collecte devrait favoriser sa croissance. La part de marché de CGEA est de 3%. Plusieurs groupes britanniques détiennent des parts de marché similaires, Biffa (4%), UK Waste (4%) Shanks & McEwan (4%)...

Les groupes français privilégient le développe-

sont pleinement propriétaires de leurs actifs et doivent assumer la totalité des investissements induits.

LE MARCHÉ ESPAGNOL

Le marché des déchets solides représente 2,5 milliards d'Euros dont 1 milliard pour les ordures ménagères.

85 % des déchets vont en décharge

La production de déchets urbains reste inférieure à la moyenne de l'Union Européenne même si elle croît de 3,5% par an en moyenne depuis 1989. Près de 85% de ces déchets finissent à la décharge, 11% sont utilisés en compost et 4,5% sont incinérés. D'ici l'an 2000, la mise en chantier de 6 usines d'incinération est prévue.

La gestion des déchets est contrôlée par les Communautés autonomes. Par des contrats de délégation, la collecte des déchets a été confiée à 65% à des entreprises privées, ce qui représente 1,2 milliard d'Euros de chiffre d'affaires. Une croissance de 7% est prévue à moyen terme.

La réglementation locale est, pour l'instant, très réduite. Un plan d'élimination des déchets industriels a été lancé en 1995 et une loi visant à transposer la directive européenne de 1991 a été approuvée au début de l'année 1998. Cette loi impose aux communes de plus de 5 000 habitants d'organiser la collecte et la destruction des ordures ménagères à partir de 2001.

Forte concurrence sur le marché de la gestion des déchets

Du fait des surcapacités dans la construction, les groupes du BTP se sont diversifiés dans la gestion des déchets. Cela a généré une vive concurrence qui s'est traduite par la diminution des marges d'exploitation. Sur ce marché très capitalistique où les délais de paiement sont longs, seules les grandes entreprises parviennent à se maintenir et les mouvements de concentration se multiplient. Les groupes espagnols intervenant dans ce secteur ne cherchent pas à s'implanter dans les pays européens où la concurrence est forte mais ils s'intéressent à l'Amérique latine.

Environ 70 % du marché privé des déchets est détenu par FCC qui dessert 42 % de la population espagnole, gère 65 décharges et réalise un chiffre d'affaires de 0,6 milliards d'Euros. FCC est aussi

le deuxième intervenant dans la distribution d'eau. Grâce à sa structure financière solide, le groupe peut se développer dans les concessions.

En juillet 1996, Dragados a signé un accord avec FCC portant notamment sur les concessions dans le domaine de l'environnement. Dragados est présent dans les concessions de toute nature et notamment dans le traitement des déchets. Il est le premier intervenant dans l'incinération des déchets.

Cespa, co-entreprise (à 50/50) entre Aguas de Barcelona et Sita est n°2 derrière FCC-Dragados. Cespa s'occupe de la collecte et de la mise en décharge, du nettoyage des rues, du jardinage, de la maintenance des réseaux d'assainissement. Dans ce domaine, privatisé à 80%, l'entreprise détient 14 % des parts de marché contre 70 % pour FCC. Cespa intervient aussi dans le traitement et l'exploitation des décharges.

Cubiertas y Entrecanales dispose d'une activité de services urbains et exploite un incinérateur à Barcelone.

Concernant les déchets spéciaux, la priorité est à la suppression des décharges sauvages et à la création d'équipements d'incinération. Les besoins de traitement sont très importants. Les Communautés autonomes sont responsables du traitement et dans 70% des cas, elles confient l'exploitation à un tiers. Hidronor, basé dans le pays Basque et Técnicas de Protección Ambiental dans la région de Madrid sont les deux premiers intervenants. D'autre part, la dépollution des sols dans les décharges non autorisées est un marché qui commence à se développer.

Importants travaux de rénovation des réseaux d'eau

La ressource potentielle est d'environ 2800 m³/habitant/an et suivant les années, les ressources peuvent varier considérablement. Pour réguler ces ressources, 800 barrages réservoirs ont été construits. Comme dans la plupart des pays occidentaux, la consommation d'eau régresse légèrement et la croissance ne peut donc venir que d'une augmentation des tarifs en liaison avec les travaux nécessaires à la rénovation des réseaux de distribution.

La distribution de l'eau est organisée par les autorités locales qui délèguent de plus en plus souvent ce service à des entreprises privées (39% du total en 1998 et 55% en 2000 selon les prévisions). Le développement des privatisations est lié au besoin de financement pour les infrastructures, aux orientations du Parti conserva-

teur et à la nécessité d'augmenter le prix de l'eau qui est l'un des plus bas d'Europe. Le mécanisme des concessions en vigueur en Espagne est assez proche du système français.

Avec 60% des parts de marché, Agbar domine le marché de l'eau et cherche à se développer dans le domaine du traitement. Ce groupe devrait profiter d'opportunités dans le domaine des privatisations combinant l'eau et l'électricité grâce à des partenariats avec des producteurs d'électricité.

La concurrence est rude sur le marché de l'eau depuis l'arrivée des entreprises de BTP qui ont des relations privilégiées avec les collectivités locales, une large gamme de services et qui sont en mesure de mener une guerre des prix. A l'avenir, la concurrence opposera principalement deux groupes, Interagua (50% Agbar, 35% Endesa, 14% Argentina) et FCC.

Développement des infrastructures de traitement des déchets liquides

Seulement 50 à 60% des déchets liquides sont traités. Des investissements importants sont à réaliser (10 Mds Euros entre 1998 et 2008) afin de respecter la réglementation européenne. Le prix de l'eau devrait donc augmenter, ce qui ne se répercutera pas sur les marges en raison de l'intensification de la concurrence et de l'élévation des droits d'entrée. Près de 75% du marché de l'assainissement est privatisé et 25% du marché privé est détenu par Agbar.