

Travaux

n° 805

ÉTRANGER

- Le tunnel foré d'Anvers

- Mitholz : tunnel de base du Lötschberg - Section nord

- Le tunnel du Raimeux

- Heathrow : des tunnels pour l'A380

- Le tunnel TGV du Groene Hart

FRANCE

- Le tunnel sud de Saorge

- Le métro de Toulouse - Lot 2

- Toulouse : galerie technique pour la ZAC de l'Aéroconstellation

TECHNIQUE

- Evolution des techniques de monitoring temps réel sur les chantiers de percement de tunnels urbains

- Le béton dans les travaux souterrains

INNOVATION

- Les suites d'un Prix de l'innovation : " Bientôt le 100^e pont "



Travaux souterrains

sommaire

Travaux
numéro 805

février 2004

Travaux souterrains



Notre couverture

Colombie : Chingaza.
Réhabilitation d'une conduite
d'amenée d'eau

© Solétanche Bachy

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

RÉDACTION

Roland Girardot et Henry Thonier
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 44 13 31 83
thonierh@fnpt.fr

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart
Tél. : (33) 02 41 18 11 41
Fax : (33) 02 41 18 11 51
francoise.godart@wanadoo.fr

VENTES ET ABONNEMENTS

Agnès Petolon
10, rue Clément Marot - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 40 73 80 05
revuetravaux@wanadoo.fr

France (11 numéros) : 170 € TTC
Etranger (11 numéros) : 210 €
Etudiants (11 numéros) : 60 €
Prix du numéro : 20 € (+ frais de port)

MAQUETTE

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

PUBLICITÉ

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

Imprimerie Chirat
Saint-Just la Pendue (Loire)

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

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

Editions Science et Industrie S.A.

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

éditorial

Daniel Tardy

1

actualités

6

techniques et matériaux

11

matériels

13

prébauma

16

PRÉFACE

Jean Philippe

21

ÉTRANGER

◆ Le tunnel foré d'Anvers. Une liaison nord-sud à grande vitesse
- *The Antwerp bored tunnel. A high-speed North-South link*

22

J.-Ch. Vereerstraeten, H. Jacobs, M. Buckens

◆ Mitholz : tunnel de base du Lötschberg - Section nord
- *Mitholz : Lötschberg Base Tunnel - Northern section*
M. Huysman, H. Pialoux, Fr. Pogu, L. Spenle

30

◆ Le tunnel du Raimeux. Conception et exécution -
Passage de la molasse
- *Raimeux tunnel. Design and construction - Passing through the molasse*

34

P. Kohler

◆ Des tunnels pour l'A380. 14 km de tunnels à construire en 4 ans sous Heathrow
- *Tunnels for the A380. 14 km of tunnels to be constructed in four years under Heathrow*

41

J.-L. Audureau, S. Thacker, I. Williams

◆ Le tunnel TGV du Groene-Hart. Un ouvrage exceptionnel qui ouvre de nouvelles perspectives
- *The Groene-Hart high-speed train tunnel. An exceptional structure opening up new perspectives*

49

P. Aristaghes, Ph. Autuori, V. Blanchet, J.-P. Hémerly, P. Longchamp



Sommaire

février 2004

Travaux souterrains

Dans les prochains numéros

Tunnel

de Toulon

Sols

et fondations

Routes

LGV Est

Travaux urbains

Réhabilitation

d'ouvrages

Terrassements

Ponts



FRANCE

◆ Le tunnel sud de Saorge. L'incidence de la circulaire 2000-63 sur un tunnel prêt à être mis en service
- *The southern Saorge tunnel. Consequences of circular 2000-63 for a tunnel ready to be commissioned*

D. Charrin

◆ Le métro de Toulouse - Lot 2. Le tunnelier Carlos Gardel donne la cadence

- *The Toulouse metro - Work section 2. The Carlos Gardel TBM sets the pace*

A. Martinotto, A. Poloni, St. Campedelli, M. Roudanes

◆ Galerie technique pour la ZAC de l'Aéroconstellation de l'agglomération toulousaine

- *Main services duct for the Aéroconstellation "ZAC" (mixed development zone) in the Toulouse urban area*

Divers auteurs

TECHNIQUE

◆ Evolution des techniques de monitoring temps réel sur les chantiers de percement de tunnels urbains

- *Development of real-time monitoring techniques on urban tunnel driving projects*

E. Gastine

◆ Le béton dans les travaux souterrains

- *Concrete in underground works*

P. Guiraud, J. Abdo

INNOVATION

◆ AUTORIPAGE®, AUTOFONÇAGE®. Bientôt le 100^e pont

- *AUTORIPAGE®, AUTOFONÇAGE®. Soon the 100th bridge!*

J.-M. Beauthier

répertoire des fournisseurs

54

61

67

70

74

82

86

Voici 10 ans exactement que *Travaux* consacre un numéro spécial annuel aux travaux souterrains, et 32 ans que la revue bimestrielle *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, organe officiel de l'Association Française des Travaux en Souterrain créée en 1972, paraît régulièrement et publie articles et recommandations.

Cela démontre que nos entreprises spécialisées dans ce domaine – malgré un niveau bas du marché hexagonal – réussissent à maintenir un rythme acceptable d'activité grâce aux contrats internationaux, européens en particulier avec de nombreux chantiers de tunnels ferroviaires ou routiers en Italie, Espagne, Suisse, Grande-Bretagne ou Belgique.

Ainsi, au sein de l'AFTES, pouvons-nous continuer à valoriser ces connaissances théoriques et pratiques, ce qui se traduit par 50 recommandations publiées, 22 groupes de travail, de nombreuses visites de chantiers et un congrès international tous les 3 ans. Cette activité permet ainsi à l'AFTES de garder une place d'excellence au sein de l'Association internationale des travaux souterrains (AITES) forte de 52 pays membres.

D'autres instances françaises sont dédiées aux travaux souterrains :

- au sein de la FNTP, le Syndicat professionnel des entrepreneurs de travaux souterrains, présidé par Robert Longelin qui regroupe les principales entreprises françaises de la spécialité et défend leurs intérêts auprès des responsables politiques et administratifs ;

- l'association "Espace souterrain", fondée à l'initiative du Préfet Doublet et présidée aujourd'hui par Pierre Duffaut, regroupe non seulement des ingénieurs mais aussi des architectes, des urbanistes, des juristes qui s'intéressent à l'exploitation optimisée et durable du sous-sol en site urbain. Leur démarche dépasse le domaine des tunnels pour s'intéresser à l'ensemble des activités susceptibles d'être "implantées" en souterrain : parkings, galeries techniques, stockages, bassins d'orage, stations d'épuration, locaux industriels ou d'archivage, etc. ;

- le Comité français de mécanique des sols, dont le groupe technique TC 28 a publié récemment un recueil de plus de 700 pages sur les aspects géotechniques de la construction d'ouvrages souterrains dans des sols meubles ainsi que le Comité de géologie de l'ingénieur et le Comité de mécanique des roches dont plusieurs membres ont contribué à la rédaction de la volumineuse recommandation sur la caractérisation des massifs rocheux ;

- le Cetu (Centre d'études des tunnels), créé en 1970, qui a pour champ de compétence l'ensemble des techniques et méthodes relatives à la conception, la construction, l'entretien, l'exploitation et la sécurité des tunnels routiers. Il réalise des études et des recherches en relation avec de nombreux organismes français et étrangers, et en particulier avec les organismes du réseau scientifique et technique du ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer.

Enfin, au développement spectaculaire des travaux souterrains au cours des

cinq dernières décennies, il convient d'associer l'ensemble des acteurs majeurs que sont les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre, les bureaux d'études spécialisés, les laboratoires, les fabricants de matériel et, *last but not least*, les entreprises dont il faut souligner les qualités et le courage face aux véritables challenges que représentent souvent les constructions de grands ouvrages souterrains. C'est très précisément la raison d'être de l'AFTES de regrouper et coordonner toutes ces compétences complémentaires dans l'intérêt de tous.

Une des caractéristiques essentielles des travaux souterrains est que l'on y travaille "en aveugle" et dans un milieu totalement anisotrope, hétérogène et discontinu dans lequel les équations classiques de la mécanique des milieux continus ne s'appliquent pas réellement ! D'où l'importance de l'expérience et du "sens du terrain", qui font que la technique devient un art et que les hommes deviennent un peu des artistes, parfois des héros quand ils réussissent à vaincre des difficultés inattendues ou réputées insurmontables. Puisse ces aspects "artiste" ou "aventurier" inciter les jeunes à rejoindre les profes-

sions des travaux souterrains !

Quels sont aujourd'hui les facteurs qui contribuent à diminuer les "risques du métier" ? D'abord, les moyens techniques (nouveaux matériels, saisie et traitement informatiques des données, automatisation des tâches, moyens d'aide à la décision, suivis informatiques en temps réel des paramètres liés à l'incidence des travaux sur l'environnement, etc.), et aussi les moyens contractuels et financiers (tels les contrats de partenariat ou de partage des risques) qui rendent plus abordables, tant pour les investisseurs que pour les entrepreneurs, les travaux souvent hors d'échelle que sont les très grandes infrastructures souterraines. Enfin, il faut souligner les efforts développés depuis quelques années en faveur de la sécurité (pendant les travaux et pendant l'exploitation des ouvrages) et en faveur du confort des usagers (acoustique, lumières, insertion dans le paysage, etc.). C'est précisément le but de l'AFTES d'apporter son aide à l'ensemble des intervenants en travaux souterrains (y compris les équipementiers) tant pour la promotion des tech-

niques nouvelles que pour le développement de leur activité internationale.

Du 10 au 12 octobre 2005, l'AFTES tiendra à Chambéry son congrès triennal ; cinq thèmes y seront traités : l'économie des projets, la sécurité et l'équipement des tunnels, l'environnement des ouvrages souterrains, les innovations techniques et les travaux de réhabilitation. La présence aux côtés de l'AFTES de plusieurs associations-sœurs (Suisse, Italie, Espagne) témoigne de l'importance de la coopération internationale dans ce domaine d'activité. Parallèlement, et dans l'esprit des tables rondes des derniers congrès internationaux de l'AFTES, une manifestation relative à "L'Arc alpin et les nouvelles percées ferroviaires à l'horizon 2020", sera organisée à l'initiative des collectivités démontrant s'il en était besoin les liens étroits qui existent entre les décideurs et les exécutants, grâce auxquels deviennent réalisables de très grands projets d'infrastructures souterraines.



JEAN PHILIPPE
Président de l'AFTES
Association Française
des Travaux
en Souterrain

Le tunnel foré d'Anvers

Une liaison nord-sud à

Le tunnel foré d'Anvers constitue le projet clef de la nouvelle liaison ferroviaire entre le nord et le sud de la ville d'Anvers. Cette liaison souterraine étant elle-même l'un des principaux maillons de la partie nord du réseau TGV en Belgique (ligne Bruxelles-Amsterdam). Le projet comporte le forage d'un double tunnel "simple voie" sur une longueur d'environ 1 230 m, prolongé par un pertuis "double voie" sur une longueur d'environ 200 m, ainsi que l'exécution de différents autres ouvrages. Cet article expose les particularités de ce double tunnel ferroviaire situé exclusivement en site urbain. Il expose de plus la technique de forage adoptée ainsi que les procédés d'exécution les plus caractéristiques utilisés pour la réalisation des ouvrages associés.

Photo 1
Tracé du tunnel sous la ville d'Anvers

Tunnel route under the city centre of Antwerp



■ INTRODUCTION

Fin mars 2001, au terme d'un appel d'offres international incluant une procédure de négociation, le projet n° 6370 "Jonction nord-sud d'Anvers – Tronçon Astridplein-Damplein" d'un montant de 69,3 millions d'euros hors TVA, a été attribué au groupement d'entreprises THV Asdam dont CFE, filiale belge de Vinci Construction assure la direction. Les travaux effectués pour le compte de la SNCB (Société nationale des chemins de fer belges) ont démarré en mai 2001. La direction des travaux est assurée par Tuc Rail (filiale de la SNCB), en collaboration avec le Service central d'études de De Lijn (société régionale flamande de transport urbain).

Le projet n° 6370 fait partie de la jonction nord-sud d'Anvers, l'un des maillons de la partie nord du réseau TGV en Belgique composée de trois parties :

- ◆ la ligne Bruxelles-Anvers (50,7 km);
- ◆ la jonction nord-sud d'Anvers (3,8 km);
- ◆ la ligne TGV Nord entre Anvers-Luchtbal et la frontière néerlandaise (32,5 km).

Les travaux de la jonction nord-sud d'Anvers ont démarré en 1998 entre Berchem et Anvers-Central. Cette gare (actuellement gare "cul-de-sac") disposera en 2006, dans sa nouvelle configuration, de deux voies directes au niveau -2 en direction du nord d'Anvers et des Pays-Bas (Rotterdam et Amsterdam).

■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

La liaison souterraine entre Koningin Astridplein (place Reine Astrid) et Damplein (place du Dam) comporte le forage de deux tunnels "simple voie" de 8,00 m de diamètre sur une longueur d'environ 1230 m entre Astridplein et Viséstraat (photo 1), prolongés par un pertuis "double voie" sur une longueur d'environ 200 m (entre Viséstraat et Damplein), ainsi que l'exécution de différents autres ouvrages (puits de départ, ouvrage d'arrivée, puits d'évacuation, rameaux de communication, voûte parapluie...).

Tracé des tunnels

Le tracé des tunnels se situe sous une partie ancienne de la ville, très urbanisée et à forte densité de population : les tunnels passent notamment sous une station de métro (station Astrid), sous un immeuble de 15 étages (Astrid Park Plaza Hotel) et à moins de 30 cm sous un pertuis de métro en exploitation.

Le tracé a été calculé et implanté pour le forage de tubes "simple voie".

Voussoirs

Le revêtement des tunnels (photo 2) est constitué de voussoirs préfabriqués en béton armé, de 35 cm d'épaisseur et de 1,50 m de longueur, ceci à raison de huit voussoirs (7 + 1 clef de voûte) par anneau. Le choix du système de couplage des anneaux (gauches/droits) s'est porté sur le système "Topf & Nocke" (tenon-mortaise) développé par l'un des

CALENDRIER D'EXÉCUTION

- Ordre de service : 29 mars 2001
- Début des travaux : 7 mai 2001
- Livraison des travaux :
 - 1^{re} phase : 7 septembre 2004
 - 2^e phase : 7 mars 2005 (travaux supplémentaires)
- Creusement des tunnels :
 - 1^{er} tunnel : 26 septembre 2002/17 février 2003
 - 2^e tunnel : 7 mai 2003/8 septembre 2003

grande vitesse

partenaires du groupement (Wayss & Freytag), système garantissant un excellent centrage des voussoirs entre eux.

De plus, afin d'obtenir une distribution uniforme des charges entre anneaux après montage, les voussoirs ont été équipés d'une couche intermédiaire de feutre bitumineux et de plaquettes de contreplaqué.

L'étanchéité du revêtement est garantie par l'utilisation de joints en néoprène, montés sur les voussoirs à l'usine de préfabrication.

■ GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

(figure 1)

Le sous-sol dans lequel a été réalisé le tunnel est constitué essentiellement de sables tertiaires du miocène (sables de Berchem), fins, denses, légèrement à moyennement argileux et contenant localement des inclusions coquillières. Ils présentent généralement les caractéristiques géotechniques suivantes : résistance à la pointe comprise entre 15 et 20 MPa et phi compris entre 25° et 30°.

Ils sont recouverts d'une couche d'épaisseur variable (3 à 5 m) d'alluvions quaternaires et de remblais relativement récents.

Sous les sables de Berchem se situe une couche d'argile tertiaire de l'oligocène (argile de Boom), compacte voire localement très compacte.

Le niveau de la nappe phréatique se situe en temps normal 3 à 5 m sous le niveau du terrain naturel.

Pour les besoins des travaux de creusement au tunnelier, le client avait imposé un "rabattement de sécurité" visant à descendre ce niveau d'environ 5 m sur toute la longueur du tracé, ceci afin de réduire les pressions de travail au front de taille et de limiter ainsi les risques de "blow-out" en surface.

Il convient à ce propos de noter que les sables de Berchem sont, en termes de tassements, très peu sensibles aux travaux de rabattement de nappe, l'incidence d'un rabattement de 5 m étant en pratique limitée à quelques millimètres.

■ TECHNIQUE DE FORAGE ET CARACTÉRISTIQUES DU TUNNELIER

Pour les deux tubes, le creusement a été réalisé du nord vers le sud, en raison de l'espace nécessaire pour les installations de chantier ainsi que pour le démarrage du tunnelier, qui n'était disponible que du côté nord (Viséstraat).

En fin de creusement de chaque tube, la machine est arrivée sous la station de métro Astrid où elle a été ensuite démontée. Il convient de noter que pour des raisons structurelles propres au projet, la

Jean-Charles



Vereerstraeten
DIRECTEUR DE PROJET
CFE (Vinci Construction)

Hugo Jacobs



DIRECTEUR DE PRODUCTION
CFE (Vinci Construction)

Martin Buckens



INGÉNIEUR MÉTHODES & LOGISTIQUE
TUNNELIER
CFE (Vinci Construction)



Photo 2
Vue des voussoirs constituant le revêtement du tunnel

View of the tunnel lining consisting of precast segments

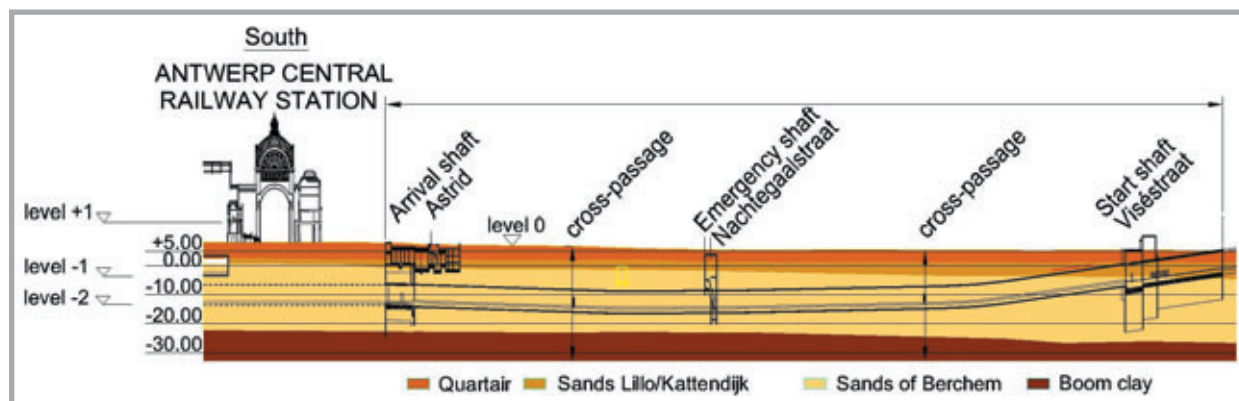


Figure 1
Profil en long et coupe géologique du tunnel

Geological and longitudinal profile of the tunnel

▶ virole extérieure (le "manteau") n'a pas été récupérée, mais que tous les organes intérieurs, ainsi que les remorques du train suiveur, ont été réutilisés d'un tube à l'autre.
Les travaux de forage ont été menés 24 heures sur 24 en trois équipes de 8 heures (à l'exclusion des week-ends).

Photo 3
Montage du tunnelier dans le puits de départ
Assembly of the TBM in the start shaft

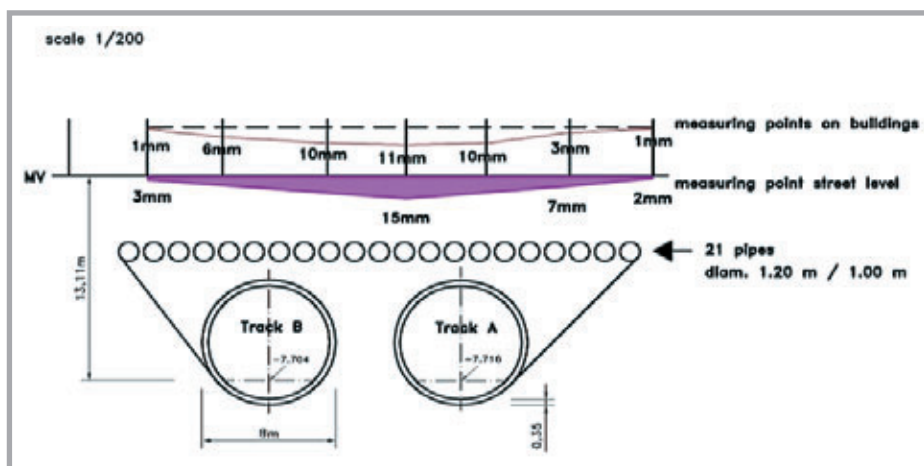


Figure 2
Coupe transversale type au droit de la voûte parapluie; tassements absolus : réalisation voûte + creusement tubes
Typical cross section at the pipe-jacked roof; absolute subsidence data : roof + tunnel borings

Caractéristiques du tunnelier

Le tunnelier utilisé pour ce projet est du type Mixshield (à pression de boue), d'un diamètre extérieur de 8,27 m. Cette machine, construite par la firme allemande Herrenknecht, présente les caractéristiques suivantes :

- ◆ longueur totale (y compris train suiveur) : 60 m ;
- ◆ longueur de la jupe : 9 m ;
- ◆ poids total (y compris train suiveur) : 680 t ;
- ◆ puissance totale installée : 1.676 kW ;
- ◆ poussée totale : 48 285 kN ;
- ◆ la tête de forage est constituée d'une roue de coupe ouverte à cinq bras, capable de tourner dans les deux sens. Des plaques de soutènement au nombre de quatre, situées entre les bras, permettent de soutenir le front de taille en cas de nécessité ;
- ◆ deux des bras de la roue de coupe sont équipés d'un outil de surcoupe. Sur un troisième bras la surcoupe peut être réalisée au moyen d'une molette ;
- ◆ le bloc d'entraînement est déplaçable longitu-

dinalement sur une distance de 400 mm et est équipé de cinq moteurs à transmission hydrostatique. Pour des coupes excentriques, le bloc peut être incliné sur un palier sphérique ;

- ◆ un système à deux rangées de brosses et une rangée d'écaillés avec remplissage des vides au moyen de graisse biodégradable est installé à l'arrière de la jupe ;
- ◆ une unité de forage peut être installée sur le châssis tournant de l'érecteur, afin de permettre le traitement du sol par injection au travers de sept orifices inclinés prévus dans la partie supérieure de la machine et de créer une voûte périphérique si nécessaire. L'unité de forage permet également de forer des trous de sondage horizontaux en avant de la tête de forage de la machine ;
- ◆ le train suiveur est équipé sur toute sa longueur d'un système de protection anti-incendie par injection automatique de mousse à très haut degré d'expansion ("Hi-ex foam").

La réception du tunnelier a eu lieu en juin 2002 chez Herrenknecht. Ont suivi ensuite, le démontage et le transport en différentes parties, par voie fluviale et terrestre, vers le chantier, et enfin le montage dans le puits de départ (photo 3).

Le forage du premier tube a démarré le 26 septembre 2002.

Contrôle des tassements

Une attention particulière a été portée à la limitation des tassements et à l'inclinaison de ces derniers (tassements différentiels). Par conséquent, des mesures très spécifiques ont été prises tant avant que pendant ou après le passage des tunneliers : "rabattement de sécurité", injections de blocage, mesures quotidiennes des mouvements du sol et des bâtiments en surface, mesures des contraintes et des déformations dans le tunnel même, etc.

Signalons qu'en fin de parcours, les tunneliers "Zandvreter" et "Krabbekoker" sont passés à moins de 30 cm sous un pertuis de métro en exploitation ainsi qu'à 3,50 m sous le radier de fondation d'un immeuble de 15 étages (Astrid Park Plaza Hotel). Les tassements enregistrés au droit de ces ouvrages n'ont pas excédé 8 mm, alors que d'une façon générale les tassements cumulés enregistrés en surface dans l'axe des tubes n'ont jamais dépassé 20 mm. Ces résultats sont conformes aux limites fixées par le cahier des charges, à savoir respectivement 10 mm et 20 mm.

PROCÉDÉS D'EXÉCUTION ORIGINAUX

Outre les techniques associées au processus de forage, de nombreux autres travaux spécialisés ont été réalisés dans le cadre du projet : parois mou-

lées, bloc de départ en ciment-bentonite, galeries et "fouilles blindées", rabattement de nappe avec réalimentation, poussage de tuyaux, parois "berlinoises", pieux sécants, jet grouting, parois cloutées, vérinage de constructions existantes, protection anti-incendie et protection acoustique des tunnels... Nous avons choisi d'illustrer ces propos en détaillant les méthodes d'exécution des quatre ouvrages suivants, qui nous paraissent les plus représentatifs :

◆ **protection des immeubles situés entre la Viséstraat et la Sint-Jobstraat : voûte parapluie réalisée au moyen de tubes poussés.**

Compte tenu du profil en long des voies au droit du puits de départ, un ensemble d'immeubles, dont l'expropriation n'était pas envisageable, a dû être protégé du fait de la couverture de sol très réduite (environ 3 m) subsistant entre leurs fondations et les tunnels forés.

Pour ce faire, une voûte parapluie d'environ 2100 m² a été réalisée sous ces immeubles au moyen de tubes poussés (figure 2), présentant les caractéristiques suivantes :

- 21 tubes parallèles distants de 30 cm, constitués d'éléments de tubes en béton armé de 3 m de longueur et de 1,20 m de diamètre extérieur (pour un diamètre intérieur de 1,00 m),
- longueur moyenne de poussage : 70 m,
- séquences de poussage alternées : poussage des tubes n^{os} 1-5-9-13-17-21, suivi du poussage des tubes n^{os} 3-7-11-15-19 et enfin des tubes n^{os} 2-4-6-8-10-12-14-16-18-20,
- tubes équipés d'orifices permettant des injections de trois types :
 - > injections primaires : de l'espace annulaire créé par la surcoupe,
 - > injections secondaires : horizontalement, entre les différents tubes poussés, de manière à assurer l'effet de voûte recherché,
 - > injections tertiaires : verticalement, entre les tubes poussés et les tunnels, immédiatement après passage du tunnelier.

◆ **Ouvrage d'arrivée : galeries, fouilles blindées et vérinage de la station de métro Astrid.**

L'ouvrage construit sous la station de métro Astrid, pour la réception des tunneliers (photos 4 et 5), doit remplir en phase d'exploitation du tunnel les fonctions suivantes : bâtiment de ventilation et d'évacuation, mais également zone de transition entre les tubes forés et le pertuis rectangulaire classique construit sous la place Astrid en direction de la gare centrale d'Anvers.

Compte tenu de leur localisation en plein centre-ville, les travaux ont été menés en différentes phases (figure 3), après un abaissement de la nappe phréatique jusqu'au niveau de l'horizon argileux (soit environ 30 m sous le niveau du terrain naturel).

Des galeries horizontales (1) ont été creusées sous la dalle de fondation de l'ouvrage existant. A partir de ces galeries, les murs du tunnel proprement dit



Photo 4
Vue de l'ouvrage d'arrivée des tunneliers sous la station de métro Astrid, après le percement du premier tube

View of the box structure built under the existing metrostation Astrid (1st tunnel tube)



Photo 5
Arrivée du tunnelier du second tube sous la station Astrid (8 septembre 2003)
Breakthrough of the TBM of the 2nd tube under metrostation Astrid (08/09/03)

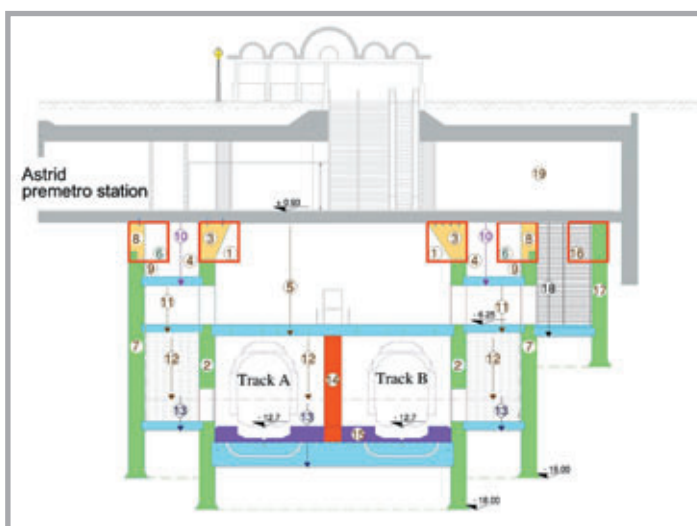


Figure 3
Coupe transversale du tunnel sous la station de métro Astrid
Cross section of the tunnel under the Astrid metrostation

ont été réalisés en "fouilles blindées" (2). Des vérins plats ont été placés et une poutre de couronnement trapézoïdale (3) a été bétonnée au-dessus de ceux-ci afin de permettre le vérinage (4) de la structure existante et d'éviter tout tassement de cette dernière. Une première phase de terrassement a ensuite été entreprise pour permettre la construction de la dalle intermédiaire (5), suivie d'une seconde pour la construction du radier du tunnel (12 et 13). Les cages d'escalier ont été réalisées en parallèle, approximativement suivant le même schéma (6 à 13).

Après creusement des deux tubes, la paroi de séparation entre les pertuis (14) a été réalisée, ainsi que le béton d'assise des voies (15). La partie

Figure 4
Coupe transversale du tunnel
au droit du puits d'évacuation
de la Nachtegaalstraat

*Cross section
of the tunnel tubes
at the emergency shaft
of the Nachtegaalstraat*

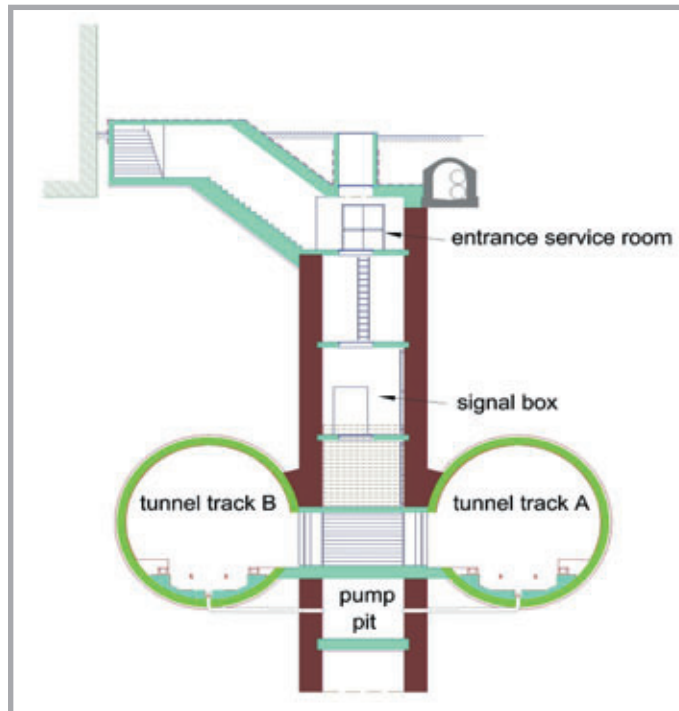
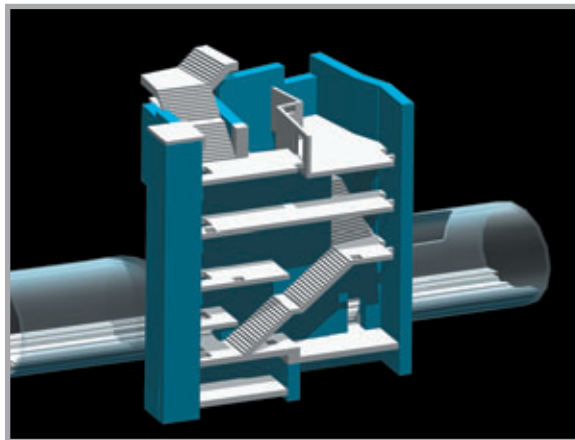


Figure 5
Puits d'évacuation
de la Nachtegaalstraat :
représentation 3D

*3D view
of the emergency shaft
of the Nachtegaalstraat*



LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Longueur totale du tunnel : 1 442,5 m
- Longueur de la partie forée : 2 455 m (2 x 1 227,5 m)
- Longueur du pertuis de sortie : 140 m
- Profondeur moyenne du tunnel foré : - 20 m
- Profondeur maximale du tunnel foré : - 23 m
- Pente maximale : 2,9 %
- Entredistance des tubes forés : 2 à 10 m
- Nombre de liaisons transversales : 2
- Nombre de sorties de secours : 3
- Diamètre extérieur des tubes forés : 8 m
- Diamètre intérieur des tubes forés : 7,30 m
- Nombre de voussoirs par anneau : 7 voussoirs + 1 clef
- Nombre total de voussoirs : 13 120 p. (± 20 000 m³ de béton)
- Excavation au moyen du tunnelier : 130 000 m³
- Autres déblais : 53 200 m³
- Béton (hors voussoirs) : 38 300 m³
- Aciers pour dito : 4 200 t

supérieure des escaliers d'évacuation (16 à 18) et les locaux destinés aux équipements électromécaniques étant réalisés en dernière phase.

◆ Puits d'évacuation de la Nachtegaalstraat : fouilles blindées.

Ce puits d'évacuation, implanté à proximité immédiate de bâtiments existants, a dû être construit sous une artère très étroite dans laquelle le trafic des tramways n'a en aucun moment pu être interrompu (figures 4 et 5).

Pour ce faire, les parois de cet ouvrage ont été réalisées en faisant appel à la technique des "fouilles blindées", suite à un rabattement de nappe dans cette zone.

Une attention toute particulière a été apportée à la liaison structurelle entre les parois du puits et le revêtement des tunnels.

◆ Construction des rameaux de communication : tubes poussés.

Les deux rameaux (situés plus ou moins à égale distance entre le puits d'évacuation ci-dessus men-

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

SNCB (Société nationale des chemins de fer belges)

Bureau d'études du maître d'ouvrage

Tuc Rail (filiale de la SNCB)

Maitre d'œuvre

Tuc Rail, en collaboration avec le Service central d'études de De Lijn

Entreprises

- Groupement "THV Asdam", composé de :
- CFE, filiale belge de VINCI Construction (B)
 - Dumez-GTM (VINCI Construction Grands Projets) (F)
 - CEI Construct (B)
 - Wayss & Freytag (D)
 - Jan De Nul (B)
 - Van Laere (B)
 - Smet Tunnelling (B)

Bureaux d'études entreprises

- CFE (B)
- Wayss & Freytag (D)
- Van Laere (B)

Principaux sous-traitants et fournisseurs

- Aertssen (terrassements) (B)
- Dahme Baustoff (voussoirs) (D)
- Fontec (parois moulées) (B)
- Herrenknecht (TBM) (D)
- Interbeton (béton) (B)
- Jansen (revêtement anti-incendie) (B)
- Smet - GWT (rabattement) (B)
- Votquenne (fouilles blindées) (B)

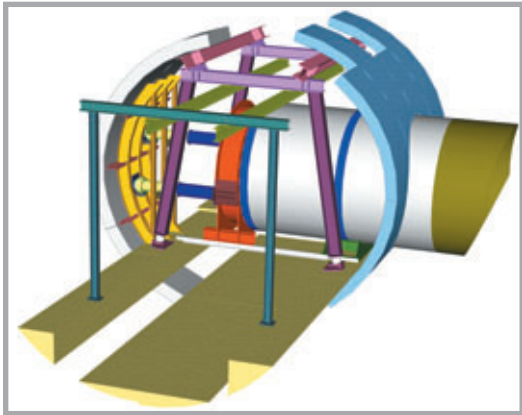


Figure 6
Installation de poussage utilisée pour la réalisation des rameaux : représentation 3D

3D view of the jacking installation used for the cross-passages

tionné et les extrémités de la partie forcée du tunnel) ont été réalisés après rabattement complet mais cependant très localisé de la nappe dans cette zone, au moyen d'éléments de tubes préfabriqués en béton, de 3,72 m de diamètre extérieur, poussés sur une distance respective de 6 et 10 m (figure 6 et photo 6).

Afin de garantir l'étanchéité complète de ces ouvrages situés à plus de 20 m de profondeur, les tubes préfabriqués ont été pourvus d'une âme métallique devant être raccordée par soudure aux voussoirs métalliques (photo 7) préalablement placés dans le revêtement des tunnels au droit des futurs rameaux.

■ RÉFÉRENCES

- M. Christiaens, E. Hemerijckx, J.-Ch. Vereers-
traeten, 2002. Comptes rendus de la journée
d'études de l'ABTUS, Bruxelles, 19/11/2002, NZ
verbinding Antwerpen – Geboorde tunnels : Specie-
fieke organisatieaspecten van de werf.
- Pr. D'P. Van Bogaert, E. Hemerijckx, J.-Ch. Ve-
reerstraeten, 2003. 5de HST studiedag, Technisch
Instituut van de KVIV, Antwerpen, 12/06/2003, NZ
verbinding Antwerpen – Geboorde tunnels in ste-
delijk gebied - Bijzondere design -, uitvoerings-en
organisatorische aspecten van een uitzonderlijk pro-
ject.
- M. Christiaens, E. Hemerijckx, J.-C. Vereers-
traeten, 2003. Proceedings of the IABSE Symposi-
um, Antwerp, August 2003, Integration of bored
tunnel and conventional technologies in crossing
below the Antwerp city centre.
- E. Hemerijckx, J. Maertens, J.-C. Vereerstraeten,
B. Vanhout, 2003. Proceedings of the IABSE Sym-
posium, Antwerp, August 2003, Pipe jacked roof
for a bored railway tunnel in Antwerp.
- P. Delizée, 2003, TGV : Jonction nord-sud Anvers
- Le tunnelier "Zandvretter" a dévoré le "cul-de-sac"



Photo 6
Installation de poussage de tubes utilisée pour la réalisation des rameaux
Jacking installation used for the cross-passages



Photo 7
Segments métalliques
utilisés pour la réalisation
des rameaux
*Steel segments used
for the construction
of the cross-passages*



**Vue du premier tube
en cours
d'achèvement**
*View of 1st tunnel
tube during
the finishing works*

► sous la gare centrale d'Anvers. *Le Journal des Ingénieurs* n° 88, septembre 2003, Fabi (Fédération d'associations belges d'ingénieurs civils).

• M. Christiaens, E. Hemerijckx, J.-Ch. Vereerstraeten, 2003. Comptes rendus de la journée d'études de l'ABTUS, Bruxelles, 25/11/2003, De boortunnel van de NZ verbinding te Antwerpen – Het concept en de uitvoeringstechnische aspecten van de verscheidene bouwputten.

ABSTRACT

The Antwerp bored tunnel. A high-speed North-South link

*J.-Ch. Vereerstraeten, H. Jacobs,
M. Buckens*

The bored tunnel of Antwerp is the key project of the new rail link between the northern and southern parts of the City of Antwerp, this underground link being itself one of the principal links on the northern section of the high-speed train network in Belgium (Brussels-Amsterdam line). The project involves boring a twin-tube "single-track" tunnel over a length of about 1230 metres, extended by "twin-track" entry and exit approaches over a length of about 200 metres, and execution of various other structures.

The present article outlines the special features of this twin-tube rail tunnel located exclusively in an urban area. It also outlines the boring technique adopted and the most characteristic construction processes used for execution of the ancillary structures.

RESUMEN ESPAÑOL

El túnel perforado de Amberes. Enlace norte-sur de alta velocidad

*J.-Ch. Vereerstraeten, H. Jacobs y
M. Buckens*

El túnel perforado de Amberes representa el proyecto clave del nuevo enlace ferroviario entre el norte y el sur de la ciudad de Amberes. Este enlace subterráneo constituye, por sí mismo, uno de los principales eslabones de la parte norte de la red de Alta Velocidad (línea Bruselas-Amsterdam). El proyecto incluye la perforación de un doble túnel de "vía única" de una longitud de aproximadamente 1.230 metros, prolongado por un vano de "doble vía" de una longitud de unos 200 metros, así como la ejecución de obras diversas. En el presente artículo se exponen las particularidades de este doble túnel ferroviario situado exclusivamente en medio urbano. También se presenta la técnica de perforación adoptada, así como los procedimientos de ejecución más característicos aplicados para la ejecución de estructuras que completan este proyecto.

Mitholz : tunnel de base

Section nord

D'un montant d'environ 600 M CHF (400 millions d'euros) et devant être réalisés dans un délai de 72 mois, les travaux du tunnel de base du Lötschberg – Section Nord – Mitholz couvrent principalement l'excavation à l'explosif-émulsion de 26 km de tubes de section 65 m² dans des formations géologiques très différentes avec risques d'arrivées d'eau sous haute pression et le revêtement des galeries sur 17 km par bétonnage en place.

Après 3 ans et demi, 85 % des travaux d'attaque ont été effectués et 4900 m de tunnel ont été revêtus.

Mitholz constitue le principal lot de travaux du tunnel de base du Lötschberg (88 km de galeries) (figure 1), lequel s'inscrit dans le cadre du projet Alptransit, complétant le réseau ferroviaire suisse entre l'Europe du Nord et l'Italie (TGV et ferroutage). Le client B.L.S. Alptransit, filiale du concessionnaire B.L.S., prévoit la mise en service de cette nouvelle ligne au début de 2007. Le budget du projet s'élève à 3,67 milliards de CHF (2,53 milliards d'euros).

Ce projet de 35 km de longueur comporte deux tubes d'une section excavée de 65 m², à voie unique, distants de 40 m, reliés tous les 330 m par un rameau de liaison et quatre échangeurs. Situé à une altitude de 800 m, il double une ligne monotube existante, traversant le massif sur 15 km par un tunnel percé au début du XX^e siècle, implantée à une altitude moyenne de 1200 m dont la section ne permet pas la circulation des nouveaux types de trains.

LE LOT MITHOLZ

Le lot comprend principalement la réalisation de trois tubes (nord-est, sud-est et sud-ouest) excavés à l'explosif, de 8500 m de longueur moyenne chacun. Pour réduire l'investissement initial, le client n'exploitera dans un premier temps que le tube Est qui seul sera revêtu et équipé sur toute sa longueur. La sécurité, lors de l'exploitation de l'ouvrage, est assurée par le tunnel Ouest d'une part et par la galerie de reconnaissance entre le "Fusspunkt" et l'entrée de Frutigen d'autre part (figure 2).

Le lot inclut également l'exécution de cavernes de service (centrale de ventilation, puits de ventilation...), les excavations complémentaires et les revêtements correspondants aux lots préparatoires qui avaient été réalisés précédemment, à savoir :

- ◆ la galerie de reconnaissance de Kandertal longue de 10 km;
- ◆ la fenêtre d'accès de Mitholz, de pente 12 % et de 1,5 km de longueur, reliant le site extérieur à la zone d'installation souterraine;
- ◆ le "Fusspunkt" (origine des excavations des trois tubes) comportant des cavernes et des galeries dédiées aux installations en phase de chantier puis à l'exploitation ultérieure de l'ouvrage.

A la signature, le 17 février 2000, le montant de ce contrat gigantesque s'élève à 543 MCHF HT (375 millions d'euros).

Les délais sont de 70 mois pour les tubes Est et 72 mois pour le tube Ouest. Ce lot se situe sur le chemin critique du projet global.

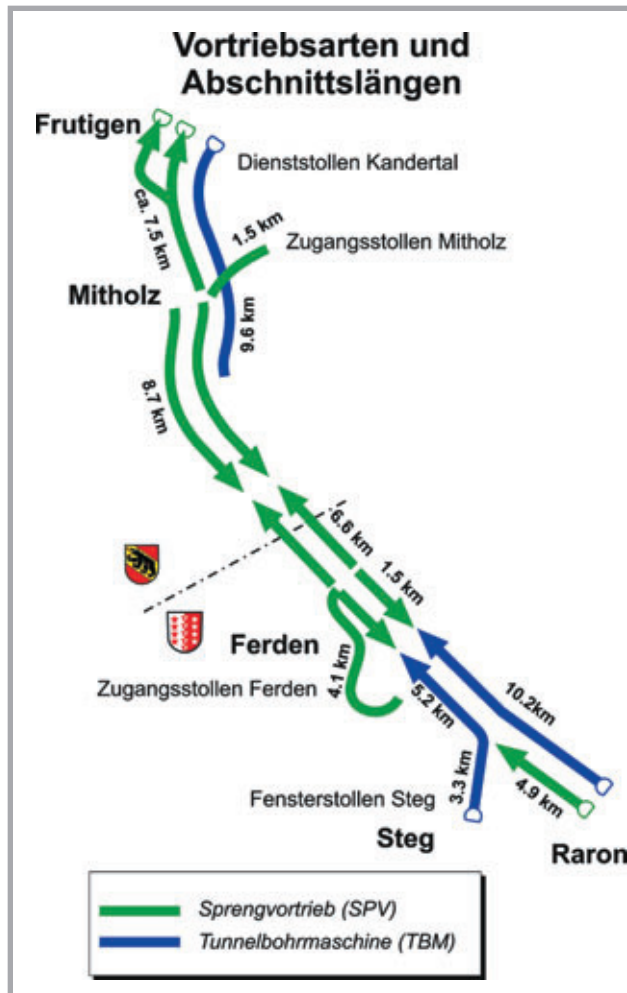
Le groupement international d'entreprises, constitué de Strabag (Autriche), Rothpletz (Suisse), Walo (Suisse), Skanska (Suède) et Vinci Construction Grands Projets (France), adjudicataire de ce lot de construction, a apporté des innovations techniques intéressantes dans la réalisation de cet ouvrage. La conception et l'élaboration des plans d'exécution relèvent de la maîtrise d'ouvrage déléguée.

L'effectif en pointe du chantier devrait compter environ 500 ouvriers et une trentaine de cadres et Etam.

GÉOLOGIE

Les tubes traversent des formations géologiques très différentes, allant des roches sédimentaires de qualités variables au granit, présentant des résistances à la compression de 5 à 200 MPa, en passant par une zone "autochtone" à calcaires pré-

Figure 1
Type d'attaque
et longueur d'excavation
Type of driving
and length of excavation



du Lötschberg -



Figure 2
Point de départ
des galeries
Starting point
for galleries

pondérants (figure 3). Vers le Sud, il est prévu de traverser une zone karstique longue de 3,5 km où sont attendues des arrivées d'eau sous haute pression (de 100 à 200 l/s, sous 45 à 65 bars). La couverture du tunnel varie de quelques mètres à 1950 m.

INSTALLATIONS

Pour des raisons environnementales, un atelier de réparations et d'entretien, les deux centrales à béton 60 m³/h avec leurs silos et réserves d'agrégats (2000 m³), l'ensemble des éléments de tri du marin, les parcs des engins et les stocks de consommables ont été installés dans les cavernes du Fusspunkt.

Les bureaux, la base-vie, la cantine et l'atelier principal sont à l'extérieur.

VENTILATION

Le principe de ventilation repose sur l'utilisation des tunnels comme gaines naturelles (figure 4). Dans tous les cas, l'extraction des fumées s'effectue des fronts jusqu'au portail d'accès au moyen

de gaines de ventilation. Au Sud, l'air frais est amené aux fronts par le tube Ouest en légère surpression et retourne vers le "Fusspunkt" en empruntant le tube Est pour remonter au portail par la fenêtre d'accès. Au Nord, l'air frais est pris dans la galerie de reconnaissance (sondage sur la figure). L'air vicié est évacué dans le tunnel jusqu'au "Fusspunkt" puis vers le portail.

Associés à un arrosage continu, des dépoussi-

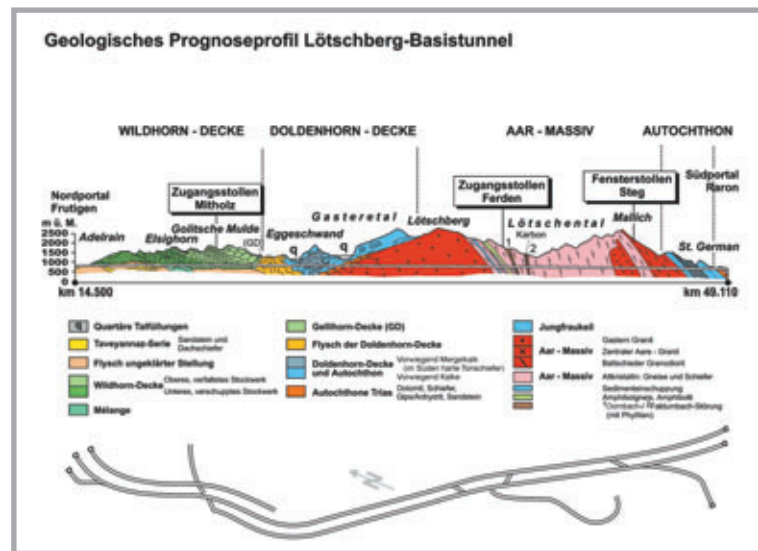


Figure 3
Estimation du profil
géologique du tunnel
de base du Lötschberg
Estimated geological
profile of the Lötschberg
base tunnel

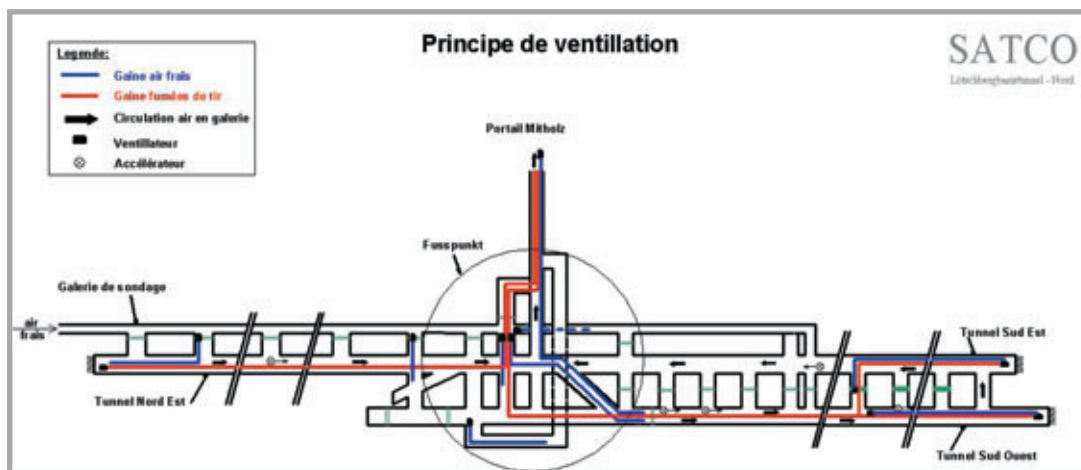


Figure 4
Principe
de ventilation
Ventilation
principe

Hugues Pialoux
DIRECTEUR DE SECTEUR
Vinci Construction Grands Projets

Marc Huysman
RESPONSABLE
SIÈGE
Vinci Construction Grands Projets

François Pogu
DIRECTEUR ADJOINT
ET RESPONSABLE BÉTON
Vinci Construction Grands Projets

Laurent Spenle
INGÉNIEUR TRAVAUX
Vinci Construction Grands Projets

Photo 1
Convoyeur
Conveyor



Photo 2
Jumbo
Atlas Copco
Atlas Copco
Jumbo



Photo 3
Concasseur
mobile
Mobile crusher



► reurs traitent l'air directement au-dessus des concasseurs afin de limiter l'émission de poussières. L'ensemble des matériels roulants est équipé de filtres à particules.

■ LES TRAVAUX

Excavation

Considérant les délais tendus, les solutions permettant l'autonomie de chaque front et la facilité de circulation ont été privilégiées.

Au Sud, les deux fronts Est et Ouest sont excavés en parallèle, chacun disposant de son propre équipement d'excavation et de soutènement, sans pignonage entre les deux tubes. Le marin, concassé près du front, est transporté par un convoyeur principal commun situé dans le tube Ouest jusqu'au Fusspunkt (photo 1). Ce principe permet de libérer rapidement le tube Est, le seul à être revêtu par la suite, facilitant ainsi l'organisation des ateliers bé-

ton. Un cotraitant est chargé d'évacuer et de traiter le marin hors du tunnel.

Au Nord, à ce jour le tunnel est percé, l'organisation était identique à celle du sud mais sur un seul front.

L'équipement d'un front est composé de :

- ◆ un jumbo semi-automatique à trois bras (Atlas Copco XL3 C) muni d'une nacelle de chargement ;
- ◆ un charge et roule GHH LF et une chargeuse Cat 966G, les deux munis d'un godet de déversement latéral ;
- ◆ une pelle Liebherr R932T équipée pour la purge ;
- ◆ un robot de projection MBT Meyco O41 EH ;
- ◆ un jumbo Atlas Copco L2C (photo 2) ;
- ◆ un camion de chargement d'émulsion Dyno Nobel ;
- ◆ une nacelle élévatrice Normet deux bras ;
- ◆ un concasseur mobile DBT SB 1315R (photo 3) ;
- ◆ une plate-forme mobile Rowa suspendue à la voûte du tunnel qui supporte l'ensemble de logistique de soutien à l'avancement sans encombrer le radier (transformateurs, compresseurs, ventilateurs, dépoussiérage, containers, etc.) ;
- ◆ un convoyeur primaire qui transporte le marin jusqu'au convoyeur principal ;
- ◆ un container de survie équipé pour recevoir un poste complet.

La foration s'effectue à pleine face et comporte en moyenne 126 trous d'abattage et de découpage de diamètre 48 et deux trous de bouchon de diamètre 102. Les plus grandes longueurs de foration sont de 4,5 m pour un résultat de 4,1 m. Tous les trous sont chargés avec de l'émulsion pompée. Le ratio d'explosif au mètre cube excavé est de 2,35 kg/m³. Les détonateurs utilisés sont de type non électrique avec des retards en milli - ou en secondes.

Les rendements obtenus sont de l'ordre de 250 m moyen/face/mois. Le meilleur mois est de 342 m pour une face et le record s'élève à 937 m pour trois faces.

Au Sud, une zone karstique a été traversée en réalisant systématiquement des forages de reconnaissance avec double "preventer", constituant ainsi une première. Les forages ont permis de détecter une zone à risques qu'il a fallu injecter avec des pressions allant jusqu'à 100 bars pour parvenir à la franchir.

Le rythme de travail est de 7 jours sur 7 - 24 heures sur 24 en trois postes.

Revêtement

Le tunnel Est reçoit entièrement un revêtement béton d'épaisseur théorique égale à 25 cm.

En premier lieu, un radier est bétonné, dans lequel sont noyés les tuyaux "d'exhaures".

Un complexe d'étanchéité est mis en place systématiquement à l'avancement sur tout le périmètre de l'arche du tunnel. Ce complexe, composé d'un

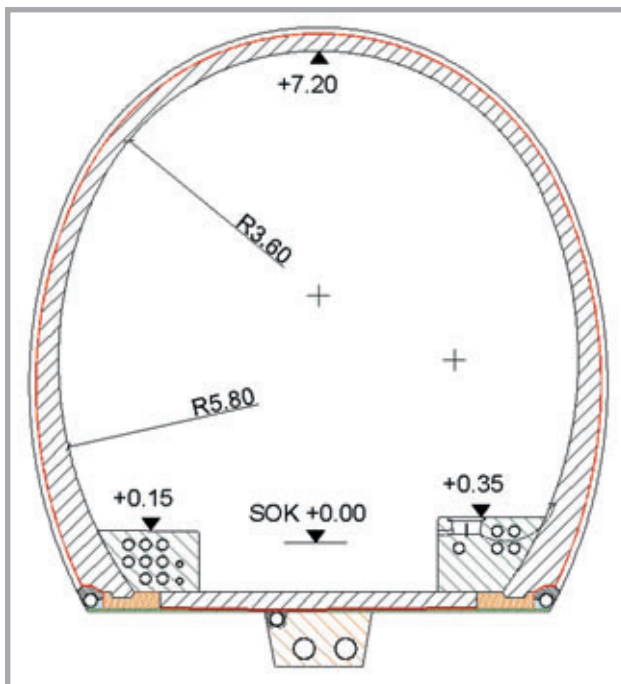


Figure 8
Coupe type

Typical cross section

géotextile de 500 g/m² et d'une membrane PVC de 2 mm d'épaisseur est mis en place sur une couche de béton projeté ayant pour objet de minimiser les vagues et d'obtenir un support ad hoc.

Une fois l'étanchéité posée, la voûte est bétonnée au moyen d'un coffrage de revêtement Novaform. Cet outil, d'approximativement 120 t, avance à une cadence d'un plot de 12,5 m/jour (hors plots spéciaux). Le béton est amené par toupies depuis la centrale située au Fusspunkt puis pompé au moyen d'une Schwing BP 2000. Le volume moyen mis en place par bloc est de 160 m³.

Les équipes travaillent en poste (7 h - 18 h / 19 h - 6 h).

Pour finir, les banquettes définitives sont mises en œuvre simultanément des deux côtés du tunnel au moyen d'un outil coffrant POSER d'un poids de 30 t permettant la circulation de la logistique béton. Dans ces banquettes sont noyés des fourreaux électriques en attente (figure 5).

Au sud, les travaux se poursuivent et 4900 m ont été revêtus à ce jour avec une moyenne de 300 m/mois (meilleur mois 387,5 m). Au nord, après la fin des excavations et le démontage des installations, les travaux de bétonnage ont débuté et devraient atteindre leur rythme de croisière (600 m/mois avec 2 coffrages) d'ici quelques mois.

CONCLUSION

Compte tenu des sévères contraintes d'exécution, liées au respect de l'environnement, à la qualité exigée, aux délais à respecter et aux quantités rencontrées qui le caractérisent, le tunnel de Mitholz est un ouvrage européen hors du commun dont la réalisation est un challenge indéniable.

A un peu plus de 2 ans de la date de livraison du projet, il reste encore à assurer la bonne fin des travaux d'excavation et à effectuer les travaux de bétonnage qui se trouvent sur le chemin critique du chantier.

ABSTRACT

Mitholz : Lötschberg Base Tunnel - Northern section

H. Pialoux, M. Huysman, Fr. Pogu, L. Spenle

For a cost of approximately CHF 600 M (400 million euros) and with a 72-month completion deadline, the works on the Lötschberg base tunnel, Mitholz northern section, involve mainly the excavation with emulsion explosive of 26 km of tubes of cross section 65 m² in very diverse geological formations with risks of high-pressure water ingress, and lining of the galleries over 17 km with cast-in-place concrete.

Three and a half years on, 85 % of the tunnel driving work has been performed and 4,900 m of tunnel have been lined.

RESUMEN ESPAÑOL

Mitholz : túnel básico del Lötschberg - Sección norte

H. Pialoux, M. Huysman, Fr. Pogu y L. Spenle

Este túnel, de un importe de 600 M CHF (400 millones de euros) que deberá ser construido en un plazo de 72 meses, y las obras del túnel básico del Lötschberg – Sección Norte – Mitholz constituyen, principalmente, la excavación por explosivo-emulsión de una longitud de 26 km de tubo de 65 m² que atraviesan formaciones geológicas sumamente diferentes con riesgos de infiltraciones de agua de alta presión y el revestimiento de las galerías de una longitud de 17 km por hormigonado in situ.

Tras tres años y medio, se ha efectuado un 85 % de las obras de ataque y se ha terminado el revestimiento de 4 900 m de túnel.

Le tunnel du Raimeux

Conception et exécution -

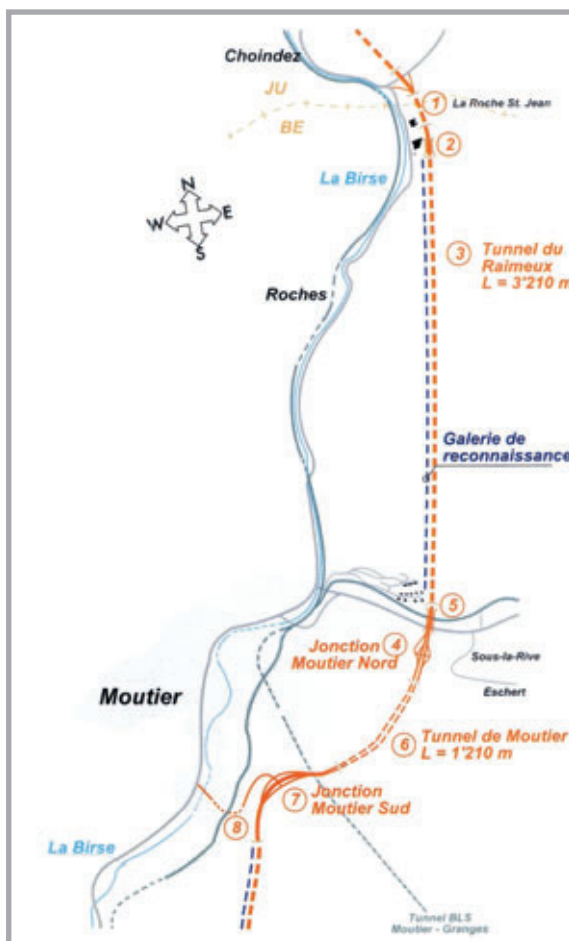
Le tunnel du Mont Raimeux a une longueur de 3200 m, il comporte un tube à deux voies bidirectionnel avec une galerie de sécurité parallèle sur toute sa longueur. Il comporte une centrale d'aspiration en caverne et un puits d'évacuation de l'air vicié de 250 m de hauteur pour 5 m de diamètre.

La construction différée d'un second tube est prise en compte par le projet. L'excavation est réalisée partiellement à l'explosif ou par des moyens mécanisés dans un massif constitué d'alternances multiples des calcaires karstifiés et des marnes gonflantes du Dogger et du Malm. L'article développe particulièrement la traversée de la molasse alsacienne de qualité très médiocre qui a nécessité un phasage détaillé et un contrôle très poussé des travaux d'excavation.



Photo 1
Situation
Location

Figure 1
Tracé
Alignment



■ GÉNÉRALITÉS

L'autoroute A16 - Transjurane relie les réseaux autoroutiers suisse et français, elle franchit la chaîne du Jura entre les rives du lac de Bielle et les villes de Montbelliard et Belfort.

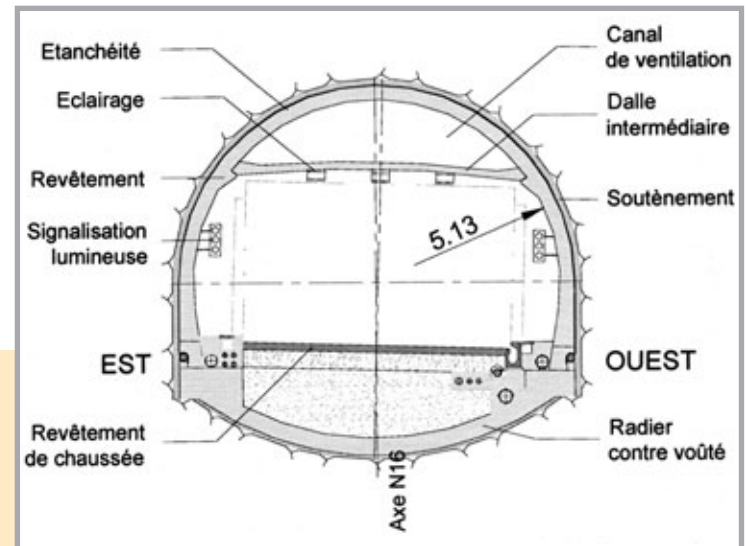
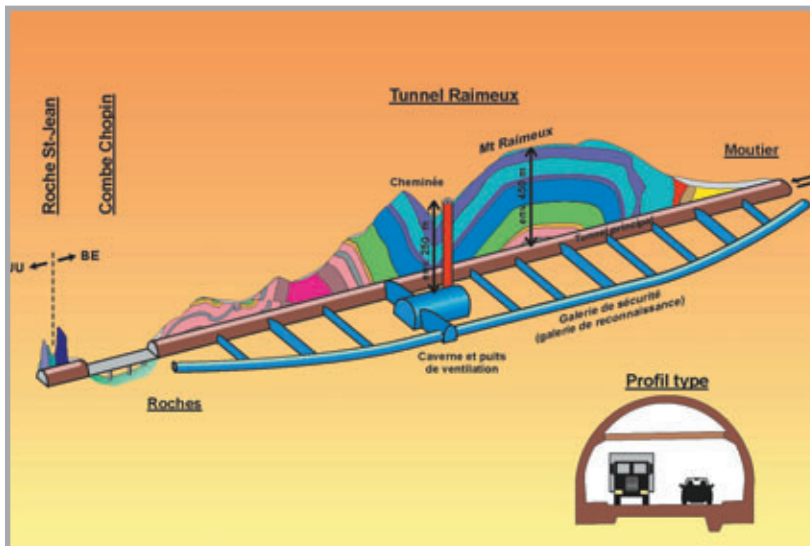
La section de la N16 - Transjurane située entre Court au sud et Roches au nord, en passant par Moutier, comporte une série d'ouvrages d'art importants dont pas moins de quatre tunnels, soit le tunnel de Graitery, les tunnels de Moutier, puis le tunnel du Raimeux et le tunnel de la Roche-St-Jean. Le tunnel du Raimeux avec ses 3 210 m de longueur est le plus long. Il est situé sur le tronçon compris entre la jonction nord de Moutier et la demi-jonction de Choindez. Il permet ainsi, avec la traversée de la Combe Chopin et du tunnel de la Roche-St-Jean, le franchissement de la Cluse de Moutier en direction du canton du Jura. La maîtrise d'œuvre de ce tronçon et de l'ensemble des trois parties d'ouvrages qui le composent est assurée par le même groupement des bureaux BG (mandataire) et GVH. Sa réalisation, en cours depuis la fin de 1999, fait l'objet d'un seul lot de génie civil attribué au consortium GTR (photo 1 et figure 1).

■ DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'OUVRAGE

Le tunnel du Raimeux comporte, dans une première phase, un seul tube à deux voies de circulation bidirectionnelle. Sa conception générale tient compte de la réalisation différée d'un deuxième tube. En première phase, la sécurité des usagers est grandement augmentée par la présence, parallèlement au tunnel, de la galerie de reconnaissance réalisée préalablement et aménagée en galerie de secours. Des galeries transversales relient le tunnel et la galerie tous les 300 m, afin de permettre le dégagement des usagers ou l'accès des secours. Le système de ventilation est de type longitudinal avec aspiration localisée des fumées en cas d'incendie. Ainsi, une gaine d'aspiration des fumées est aménagée de manière continue au-dessus de l'espace de trafic par une dalle intermédiaire. L'air vicié et les fumées sont aspirés par des ventilateurs placés dans une caverne implantée en souterrain et évacués par l'intermédiaire d'un puits de ventilation. Le puits a une hauteur de 250 m pour un diamètre intérieur de 5 m. L'aménagement intérieur du profil normal du tunnel est commun à l'ensemble



Passage de la molasse



Figures 2 et 3
Coupe générale et profil normal
General cross section and normal profile

des formations traversées. Le tunnel est étanché et drainé, il comprend un anneau intérieur de revêtement en béton, avec radier contre-voûté dans les marnes et la molasse (figures 2 et 3).

■ GÉOLOGIE/GÉOTECHNIQUE

Cadre général

Le tunnel recoupe le Mont Raimeux sur un tracé parallèle à la Cluse de Moutier. Son tracé est conditionné par la réalisation de la demi-jonction Choindez et par la limitation de la longueur de l'ouvrage, ce qui ne permettait pas d'envisager le passage en tunnel de la Combe Chopin. Le massif du Raimeux est composé de plusieurs plis synclinaux/anticlinaux entrecoupés de failles et de décrochements. Les formations rocheuses sont essentiellement celles des calcaires et des marnes du Dogger et du Malm. Cette alternance de marnes et de calcaires, ainsi que la présence, parallèlement au tracé, de l'exutoire naturel de la Cluse de Moutier, est particulièrement favorable au développement d'aquifères karstiques. Les nombreuses sources connues de la cluse en témoignent.

Galerie de reconnaissance

La reconnaissance préalable du massif a été menée par la réalisation d'une galerie parallèle au tun-

nel entre 1996 et 1997 sur l'intégralité du tracé. La galerie a été forée au tunnelier Ø 3,6 m en attaque montante depuis Roche jusqu'à la limite calcaire/molasse. La reconnaissance de la molasse alsacienne située au sud s'est poursuivie en excavation traditionnelle.

Cette galerie a apporté des informations de première importance pour la conception du tunnel, dont entre autres :

- ◆ la localisation précise des différentes formations calcaires, marnes et des discontinuités du massif. Cela a permis de situer au mieux les éléments d'ouvrages particuliers que sont les cavernes de ventilation, le puits ainsi que les garages et niches de stationnement ;

- ◆ le comportement à court et moyen termes des formations marnes et marno-calcaires. La réalisation d'un programme d'auscultation et d'essais in situ a permis de quantifier les principaux paramètres (déformabilité, résistance, gonflement, etc.) des formations. Les formations marnes de l'Oxfordien et de l'Aalénien notamment, ont confirmé leur comportement gonflant et particulièrement sensible au remaniement déjà qualifié sur le tunnel du Mont Terri par exemple [1]. Notons que ces formations sont recoupées jusqu'à trois fois sur la longueur de l'ouvrage ;

- ◆ la confirmation du caractère karstique des formations calcaires de l'Hauptrogenstein et du Kimmeridgien. De très nombreux karsts actifs ont été recoupés, dont quatre, d'importance métrique, ont

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage et direction des travaux

Office des ponts et chaussées du canton de Berne

Maitrise d'œuvre

Groupement d'ingénieurs GVH-BG - BG Ingénieurs-conseils SA (mandataire) - GVH Tramelan SA

Géologue

MFR Géologie-Géotechnique

Géomètre

Bureau J.-D. Waelti, Moutier

Entrepreneur

GTR - Groupement Tunnel du Raimeux :

- Marti Tunnelbau AG (mandataire)
- Marti AG
- Marti Travaux Spéciaux SA
- Parietti & Gindrat SA
- Pro Routes SA
- Georges Chételat SA



Photo 2 et figure 4
Puits du Peux-Plus et karst actif
Peux-Plus shaft and active karst

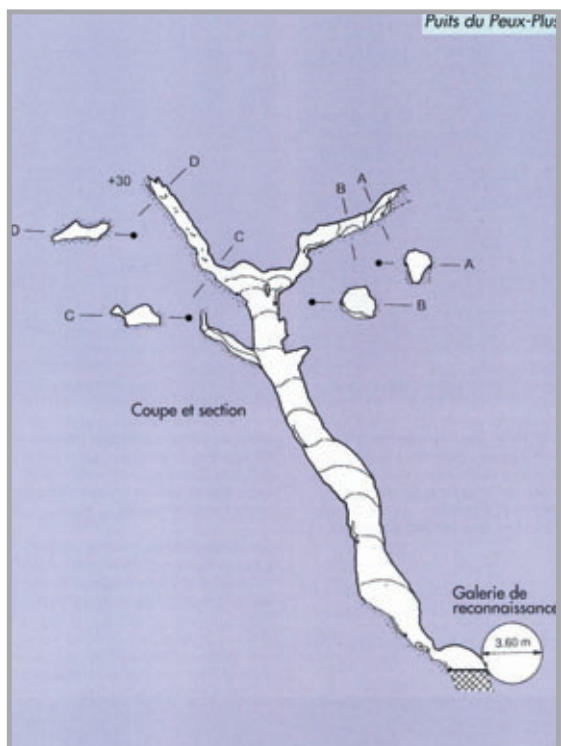
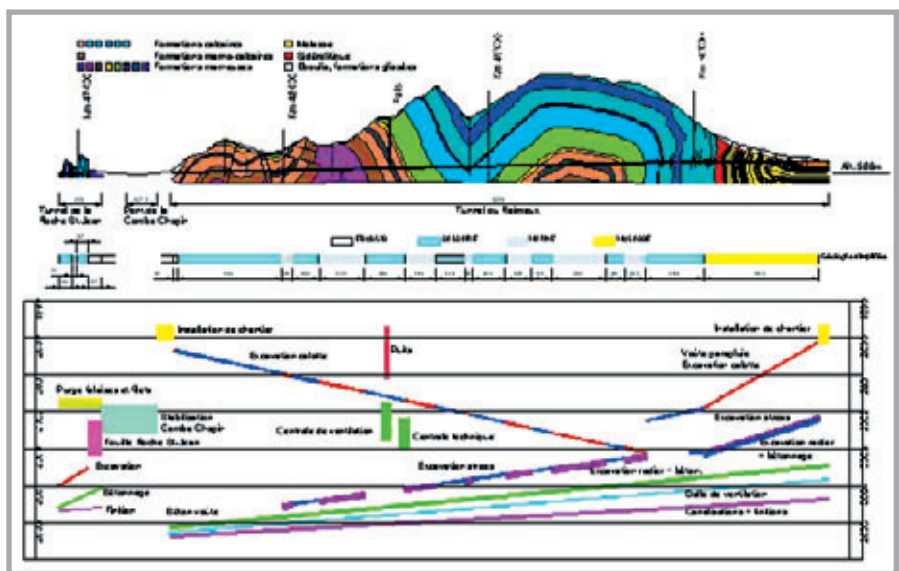


Figure 5
Programme
des travaux
Work schedule



fait l'objet d'explorations par les spéléologues de Moutier (photo 2 et figure 4). Un karst colmaté d'argile a débouffé brutalement plusieurs fois dégageant une "cheminée" explorée sur 35 m de hauteur. Les karsts actifs en permanence ou temporairement présentent une grande variation de débit (facteur 10) sur des périodes de l'ordre de l'heure. Des débits unitaires de 4 000 à 9 000 l/min. en crue ne sont pas rares ;

◆ la démonstration de la très grande variabilité et de la très mauvaise tenue de la molasse alsacienne au sud. Dans la galerie de reconnaissance l'association de grès tendres et décimentés et de légères venues d'eau ont conduit à des éboulements en calotte créant du hors-profil de plus de 6 m et cela malgré un avancement mètre par mètre avec pose systématique de cintres et béton projeté. Cette formation est composée d'alternance de marnes très tendres à mi-dures, gonflantes et extrêmement sen-

sibles à l'eau, et de grès de dureté très variable localement non cimentés. Cette molasse a un pendage subvertical favorisant la pénétration d'eau depuis la surface en suivant les interlits gréseux et créant une situation de surcharge au front d'attaque très défavorable à la tenue du souterrain ;

◆ la confirmation de l'impossibilité de traverser la molasse alsacienne sans présoutènement de l'excavation ;

◆ la mise en évidence de la présence de plans de glissement profonds affectant la molasse et de la présence de masses glissées quaternaires en surface dans la zone du portail sud du tunnel.

■ PLANIFICATION GÉNÉRALE DES TRAVAUX

Globalement, le tracé de la N16 descend de Moutier en direction de Roche. Le profil en long du tunnel a été conçu en forme de toit avec une rampe de 0,5 % sur 500 m depuis Moutier puis une pente de 1,8 % en direction de Roche.

La planification générale des travaux comporte ainsi deux attaques indépendantes montantes soit, (figure 5) depuis Moutier pour la traversée de la molasse et depuis Roche pour les marnes et les calcaires.

La présence de la galerie de reconnaissance a été mise à profit pour :

◆ permettre la réalisation du puits de ventilation par alésage d'un pré-trou réalisé au *raise drill* avec marinage par le bas ;

◆ transférer par train de galerie les matériaux d'excavation calcaires de l'attaque Roche en direction du centre de traitement situé à Moutier ;

◆ évacuer les venues d'eau captées dans les parties calcaires du tunnel sans transit par les tronçons marneux situés à l'aval par balancement en direction de la galerie.

L'attaque Roche prévoyait une excavation à l'explosif en calcaire et à la machine à attaque ponctuelle (TSM) dans les marnes en section divisée calotte/stross. Il était également prévu de réaliser une galerie pilote raccordée au puits de ventilation pour permettre l'aspiration des poussières de la TSM par l'avant. Cette solution qui plaçait le puits sur le chemin critique du programme n'a finalement pas été réalisée.

L'entreprise a proposé et réalisé l'excavation des marnes en calotte/stross à la TSM, mais avec une ventilation aspirante avec dépoussiérage placée au front d'attaque. Cette méthode a permis de respecter les conditions d'hygiène de l'air dans les nombreux, mais relativement courts, tronçons marneux.

Les travaux de génie civil sont évalués à 80 M€ pour le tunnel auquel il faut ajouter 6 M€ pour la réalisation préalable de la galerie de reconnaissance et environ 1,5 M€ pour son aménagement

en galerie de sécurité intégrée à l'exploitation de l'ouvrage à un tube bidirectionnel.

EXCAVATION DANS LA MOLASSE

Méthode de creusement

La traversée des molasses alsaciennes sur 500 m côté sud présente sans conteste une des difficultés majeures du projet. Les expériences précédentes des tunnels du Mont Terri, du Mont Russelin ou de la Rochette ont été prises en compte.

Les caractéristiques mécaniques de cette formation très hétérogène sont extrêmement variables en fonction de la part grès/marnes/argiles d'une part et très sensibles aux remaniements et aux venues d'eau d'autre part. Elle présente également un comportement différé, rhéologique, marqué (fluage, gonflement).

La nécessité d'une méthode d'excavation douce préservant la "roche", associée à un présoutènement à l'avancement pour assurer la stabilité du front s'est vite imposée. La méthode retenue comprend une excavation mécanisée soit à la pelle lourde soit au TSM en section divisée calotte, stross et radier contre-voûté.

Le soutènement de la calotte prévoit la réalisation d'une voûte parapluie composée de 22 à 33 tubes espacés de 45 à 55 cm d'une longueur totale de 14 m, pour des étapes de 11 m. Les tubes métalliques ont un diamètre de 159 mm pour 8 mm d'épaisseur de paroi. Ils sont scellés au mortier dans un forage réalisé selon le principe Odex. L'avancement est réalisé par étapes de 1 à 2 m avec pose immédiate de cintres lourds HEB 200 et bétonnage d'un anneau porteur en béton derrière un treillis de coffrage. La stabilité du front est assurée par béton projeté. L'avancement moyen obtenu de la calotte est ainsi d'environ 1,5 m/jour.

L'excavation du stross et du radier est faite après achèvement de la calotte. Le stross est excavé avec reprise en sous-œuvre alterné des piédroits gauche et droite. La reprise en sous-œuvre est réalisée par étapes de 2 à 3 m maximum avec pose immédiate de cintres et bétonnage de la semelle et du piédroit. Le radier est ensuite excavé et bétonné entre les semelles. Les chantiers de terrassement des piédroits jusqu'au bétonnage du radier se suivent sur une distance de 60 m au maximum. Cela permet d'assurer la fermeture complète du profil dans les plus brefs délais (figure 6).

Dimensionnement du soutènement tunnel

La stabilité de l'excavation et la définition des soutènements ont été appréciées par calcul aux éléments finis, à l'aide du programme très performant

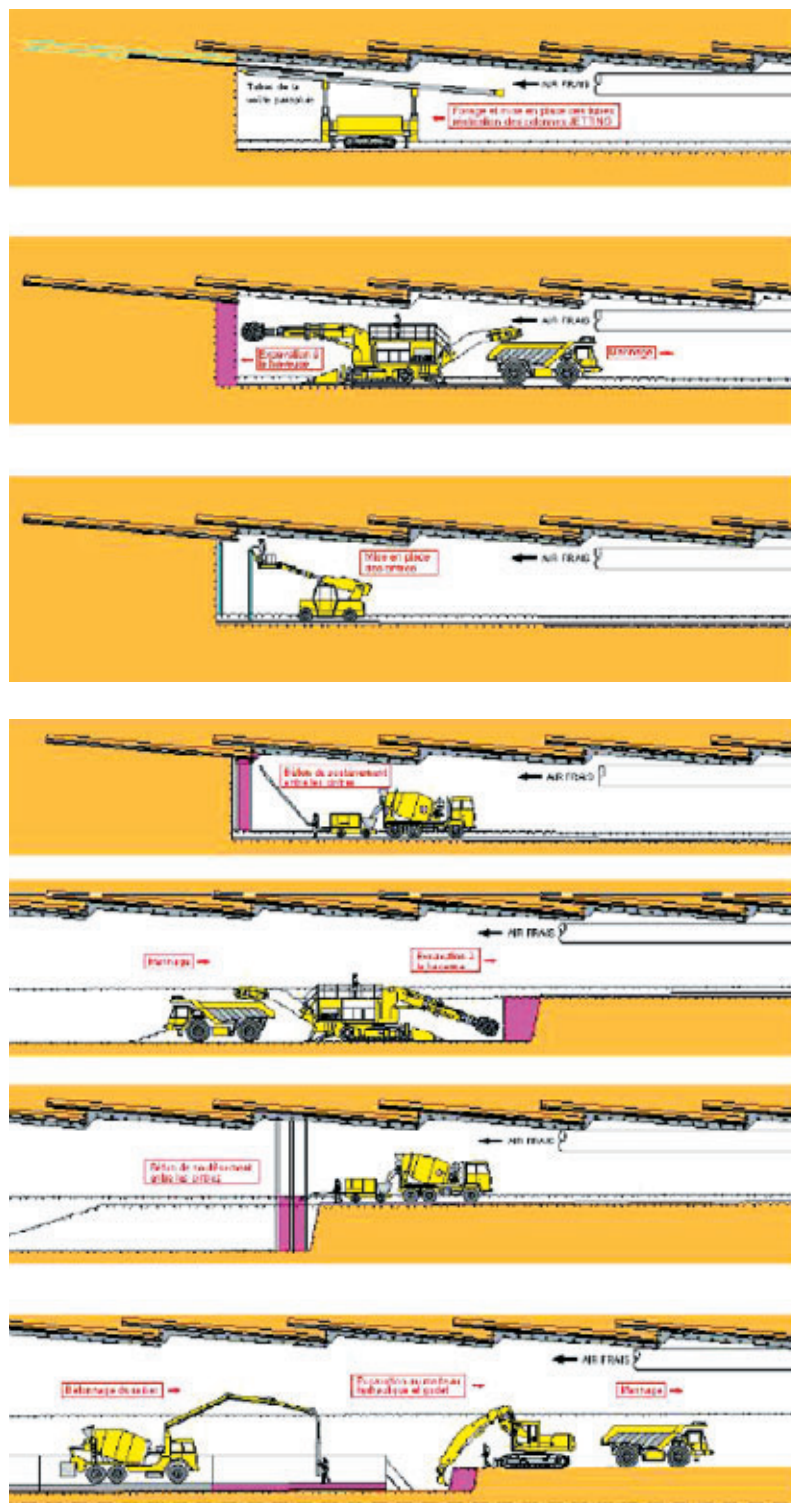


Figure 6
Excavation de la molasse
Molasse excavation

Z-Soil. Ce programme permet une excellente simulation 2D/3D du cycle complet d'excavation en section divisée avec pose progressive de soutènement (figure 7 et photo 3). Les calculs ont été réalisés avec une série de "jeux de paramètres géomécaniques" représentatifs de l'hétérogénéité de comportement de la molasse. Ces calculs ont montré la criticité de la stabilité de la phase "calotte" en terme de plastification des appuis de la voûte de soutènement (poinçonnement) liée au soulèvement du radier provisoire de la calotte. Cela nous a conduit de prévoir pour la réalisation :

- ◆ la possibilité de réaliser la fermeture complète du profil calotte par la pose d'étrésillons associée

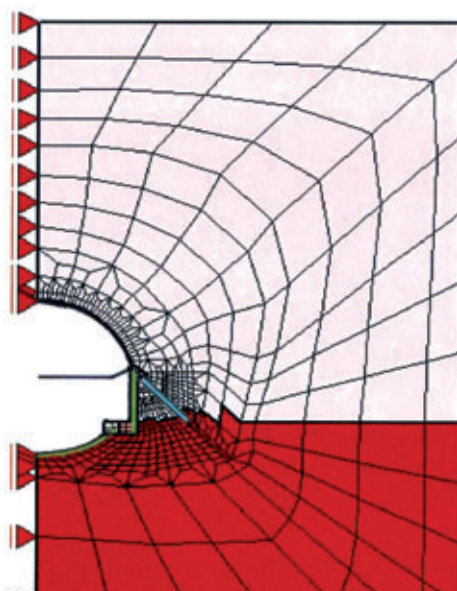
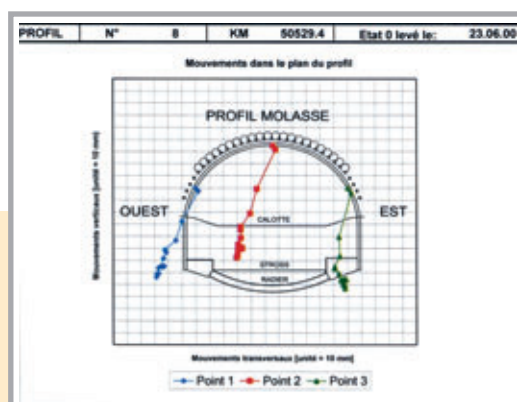


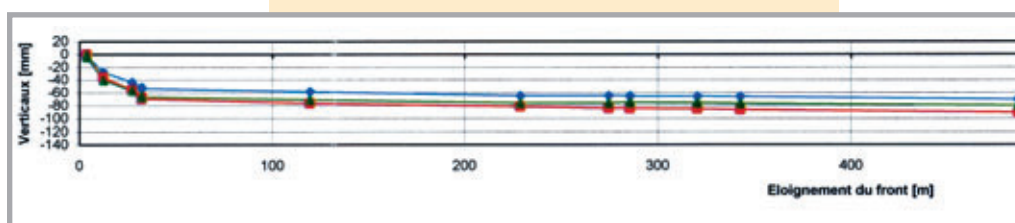
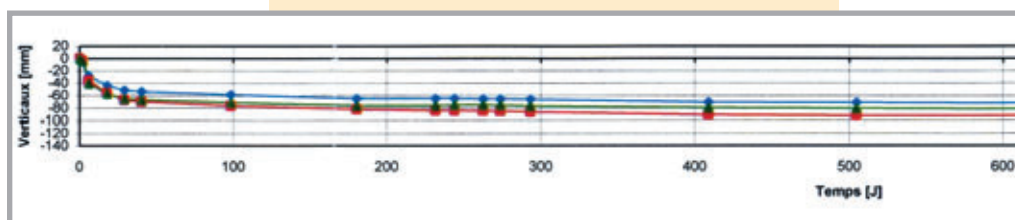
Figure 7
Modèle EF
EF model



Photo 3



Figures 8, 9 et 10
Instrumentation
Instrumentation



veillance planifiée et régulière de son comportement, tant sur le plan des convergences que des tassements. Un système de mesures de "cibles" fixées sur les cintres a été mis en place en collaboration avec le géomètre. Ce système présente le grand avantage de mesurer les déplacements absolus de l'ensemble des points en fonction de l'avancement du front et du temps. Ces mesures ont été réalisées dès les premières étapes de voûte parapluie et tout au long de l'attaque molasse. Les déplacements mesurés sont représentatifs de l'extrême variabilité de comportement du massif et varient de quelques millimètres à plus de 19 cm pour le tassement de la calotte. Ainsi, le passage de la calotte dans les premières étapes (1 à 6) dans une molasse gréseuse a conduit à des tassements de l'ordre du centimètre sans fermeture du profil en radier, alors que la même exécution a conduit à des tassements de 8 à 10 cm (max. 19 cm) dans les étapes (7 à 14) situées au passage du plan de glissement délimitant la molasse de la masse glissée de couverture (figures 8, 9 et 10). Ces tassements sont principalement générés par l'éloignement du front jusqu'à une distance d'environ 30 à 40 m. La mise en place d'étrésillons et le bétonnage d'un radier provisoire fermant la section ont permis de stabiliser rapidement ces tassements. Enfin, la mise en place des micropieux a assuré la stabilité de l'appui à la reprise en sous-œuvre. Les cintres ont cependant été posés systématiquement avec un décalage de 20 cm vers le haut pour éviter les sous-profilés. L'excavation sous voûte parapluie conduit à un profil conique par tronçons de 11 m. Après réalisation des piédroits et dans les quelques étapes ayant subi un fort tassement, cette surexcavation a été comblée par bétonnage derrière un treillis de coffrage créant ainsi un renfort local du soutènement à bon compte.

L'excavation du stross et du radier jusqu'à la fermeture complète du profil définitif a conduit à une augmentation des tassements d'au maximum quelques centimètres (figure 11 et photo 4).

Terrassement du portail Moutier

Le portail du tunnel à Moutier nécessite l'excavation d'une fouille provisoire d'une hauteur atteignant 15 m. Cette fouille est située à l'aval d'une "bosse" topographique significative de la présence de masses glissées recouvrant la molasse. Ces terrains glissés sont de natures variées et se présentent sous forme de grosses lentilles irrégulières. Il s'agit pour l'essentiel de marnes altérées et de limons argileux parcourus de passées de graviers. Ils sont affectés de divers plans de glissement anciens. Le soutènement de la paroi frontale de la fouille a été réalisé par 32 pieux forés Ø 100 cm non sécants, ancrés par des tirants actifs tendus à 600 ou 800 kN. Les parois laté-

- ▶ au bétonnage d'un radier complet avec l'avancement;
- ◆ la mise en place en arrière du front de micropieux pour renforcer l'appui de soutènement de la calotte lors de la reprise en sous-œuvre des piédroits;
- ◆ de prévoir la réalisation de forages de drainages longs depuis le front pour décharger la pression d'eau de compartiments aquifères subverticaux.

Instrumentation et tassements

L'excavation dans une formation aussi variable que la molasse nécessite la mise en place d'une sur-

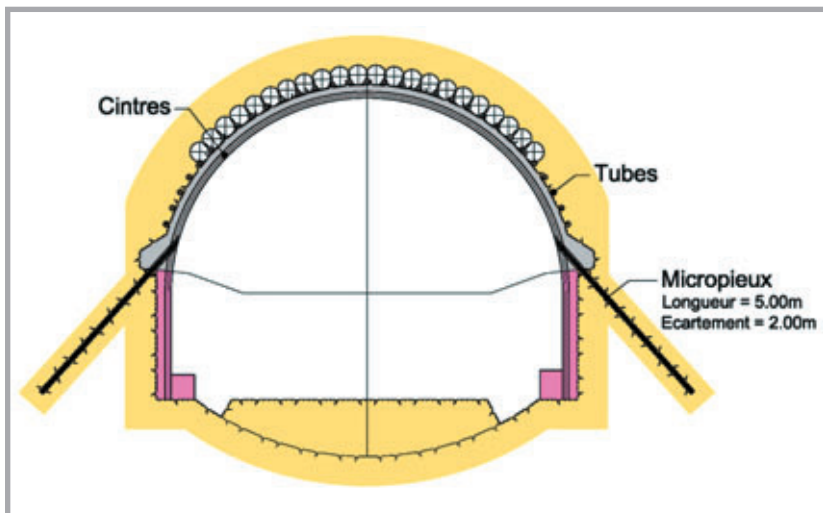


Figure 11 et photo 4
Excavation radier molasse

Molasse foundation raft excavation

rales ont été soutenues par clouage associé à des plaques ancrées. Les préterrassements talutés ont été affectés de plusieurs instabilités par réactivation d'anciens plans de glissement. Les talus définitifs inférieurs à 7 m de hauteur bordant l'autoroute ont dû être couchés à 1 : 2.5 et assainis par des tranchées drainantes transversales. Le suivi des déplacements par inclinomètres a montré que ces moyens lourds étaient nécessaires et juste suffisants pour assurer la stabilité des excavations (photos 5 et 6).

■ **CONCLUSION**

Le tunnel du Raimeux, avec ses 3 200 m de longueur, traverse l'ensemble des formations géologiques caractéristiques du Jura. Il donne un excellent aperçu de l'ensemble des problèmes géotechniques et hydrogéologiques propres à cette région.

Ainsi, la conception de l'ouvrage et la planification de sa réalisation a dû intégrer les principales difficultés que sont :

- ◆ la présence de karsts actifs et de venues d'eaux très importantes ;
- ◆ la traversée à multiples reprises des formations marneuses connues pour leur comportement gonflant ;
- ◆ la traversée de la molasse, formation particulièrement hétérogène dans son comportement et affectée de plans de glissement pré-existants particulièrement préjudiciables à la stabilité d'excavation aussi bien en fouille qu'en souterrain.

Ces contraintes conduisent à projeter et à prévoir l'utilisation de moyens et de méthodes d'exécution spécifiques à chaque situation, comme l'explosif ou la machine à attaque ponctuelle, mais adaptables rapidement aux réalités rencontrées au front



Photos 5 et 6
Excavation du portail de Moutier
Excavation of the Moutier portal



► d'attaque, comme le présoutènement avec voûte parapluie ou la fermeture rapide du profil. A ce titre, l'anticipation des actions par la connaissance de l'évolution possible des conditions géologiques est fondamentale.

■ RÉFÉRENCES

[1] "Dimensionnement d'un tunnel basé sur l'auscultation de la galerie de reconnaissance". P. Kohler, BG Ing.-cons. SA, documentation D0701 SIA Formation continue universitaire.

ABSTRACT

Raimeux tunnel. Design and construction - Passing through the molasse

P. Kohler

The Mont Raimeux tunnel is 3,200 metres long, and comprises a twin-track two-way tube with a parallel safety gallery over its entire length. It includes a cavern exhaust ventilation unit, and a foul air removal shaft 250 metres high and 5 metres in diameter.

The subsequent construction of a second tube is allowed for by the project. Excavation is performed partly by explosive or by mechanised facilities in rocky ground formed of multiple alternations of the karstified limestones and swelling marls of the Middle and Upper Jurassic. The article deals in special detail with the passage through the Alsatian molasse of very mediocre quality, which required detailed scheduling and very close control of excavation work.

RESUMEN ESPAÑOL

El túnel de Raimeux. Diseño y ejecución - Travesía de terrenos de molasas

P. Kohler

El túnel del Mont Raimeux tiene una longitud de 3200 m y está formado por un tubo bidireccional de dos vías con una galería de seguridad paralela en la totalidad de su longitud. Este túnel dispone de una central de aspiración en caverna y un pozo de evacuación del aire viciado de 250 m de altura por 5 m de diámetro. En el proyecto se tiene en cuenta la construcción ulterior de un segundo tubo. La excavación se ejecuta parcialmente mediante explosivos o por maquinaria de extracción en un macizo formado por alternancias múltiples de las calizas karstificadas del Dogger y del Malm.

En este artículo se desarrolla, particularmente, la travesía en la zona de molasas en la región alsaciana cuya calidad es mediocre y ha precisado un cálculo de las fases de ataque sumamente detallado, así como un control sumamente estricto de las etapas sucesivas de las obras de excavación.

Des tunnels pour l'A380

14 km de tunnels à construire en 4 ans sous Heathrow

Dans le cadre de la construction d'un cinquième terminal sur Heathrow, VINCI Construction Grands Projets, en association avec Morgan=est, réalise plus de 14 km de tunnels sous l'un des plus importants aéroports au monde. Pour s'adapter aux contraintes particulières du site et à l'environnement aéroportuaire, l'équipe chantier a dû développer des techniques particulières, notamment un tunnelier bi-mode pression d'air et pression de terre et une méthode permettant l'installation d'un revêtement permanent en béton projeté à l'avancement comme présenté dans cet article. La nature du contrat, particulièrement innovante, que le maître d'ouvrage a mis en œuvre pour mener à bien un investissement de plus de 5 milliards d'euros est l'une des caractéristiques remarquables de ce projet (photo 1).

INTRODUCTION - DESCRIPTION T5

Pour conserver à Heathrow sa première place de plate-forme internationale, BAA (l'équivalent anglais d'Aéroport de Paris) a engagé un vaste programme de travaux. Il s'agit essentiellement de doter l'aéroport existant d'un cinquième terminal, de 42 stands d'avion supplémentaires ce qui augmentera la capacité d'accueil de 60 millions de passagers par an aujourd'hui à 80 millions en 2008 et permettra l'accueil de la prochaine génération de gros porteurs dont l'A380 est la figure de proue. Le projet a été l'objet d'une opposition acharnée de la part des riverains et des lobbies écologistes qui ne s'est résolue qu'après la plus longue enquête d'utilité publique de l'histoire anglaise. Dans le cadre de ce projet titanesque de 5,2 milliards d'euros, VINCI Construction Grands Projets, en groupement 50-50 avec son partenaire anglais Morgan=est, s'est vu confier la réalisation de plusieurs lots de travaux souterrains dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau I. Au total, près de 14 400 m de tunnels/puits à construire sous l'aéroport entre mars 2002 et septembre 2006 pour un montant estimé de 250 millions d'euros (photo 2).

AIRSIDE ROAD TUNNEL (ART) - UN TUNNEL ROUTIER SOUS L'AÉROPORT

Une conception largement influencée par les contraintes opérationnelles de l'aéroport

Le cahier des charges donné à l'équipe était d'établir un lien routier entre les terminaux 1, 2 et 3 et

Jean-Luc Audureau
DIRECTEUR ADJOINT
CHANTIER
VINCI Construction Grands Projets



Selby Thacker
DIRECTEUR CHANTIER
Morgan=est



Ian Williams
RESPONSABLE MAÎTRISE
D'OUVRAGE
BAA



Photo 1
Heathrow photo aérienne, sur la gauche en image de synthèse, T5 en 2008

Aerial photo of Heathrow with, on the left, in composite image form, T5 in 2008

	Usage	Longueur	Diamètre intérieur	Ouvrages annexes
Airside Road Tunnel (ART)	Routier	1 290 m et 1 250 m	8,10 m	10 intertubes et 2 chambres techniques souterraines
Heathrow Express (HexEx)	Méto	1 421 m et 1 791 m	5,67 m	2 puits d'intervention et de ventilation ainsi que rameaux de connexion
Piccadilly Line (PiccEx)	Méto	1 634 m et 1 650 m	4,50 m	3 puits d'intervention et de ventilation ainsi que rameaux de connexion, ouvrage de connexion avec l'existant en tranchées couvertes / tunnels
Storm Water Tunnel (SWOT)	Emissaire	4.065 m	2.91 m	4 puits de connexion avec la surface

Tableau I
Caractéristiques des différents tunnels

Characteristics of the various tunnels



Photo 2
Visualisation des tracés en plan des différents tunnels sur une photo aérienne de l'aéroport

View of the horizontal alignments of the various tunnels on an aerial photo of the airport

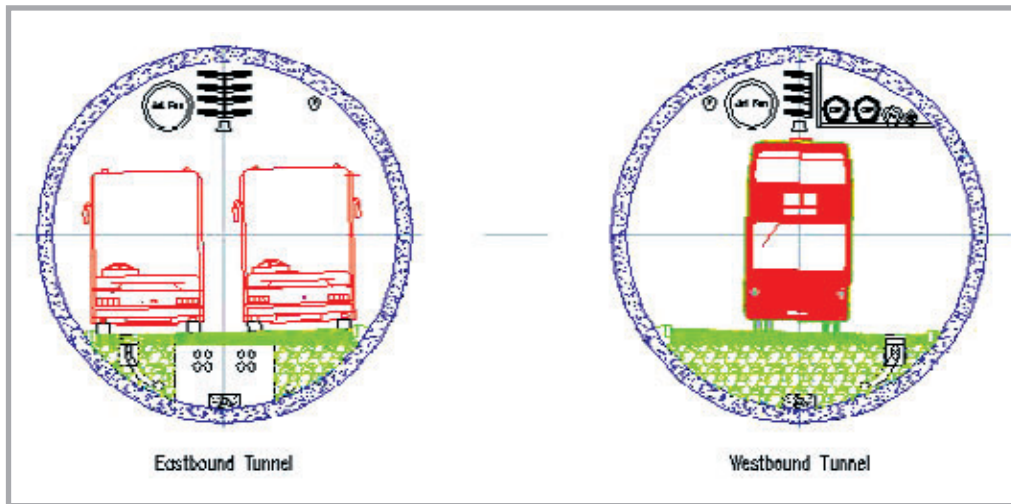


Figure 3
Section type
des tunnels
avec gabarit routier
*Typical cross section
of the tunnels
with road gauge*



Photo 4
Tracé en plan
de l'ART (Airside
Road Tunnel)
*Horizontal alignment
of the ART (Airside
Road Tunnel)*

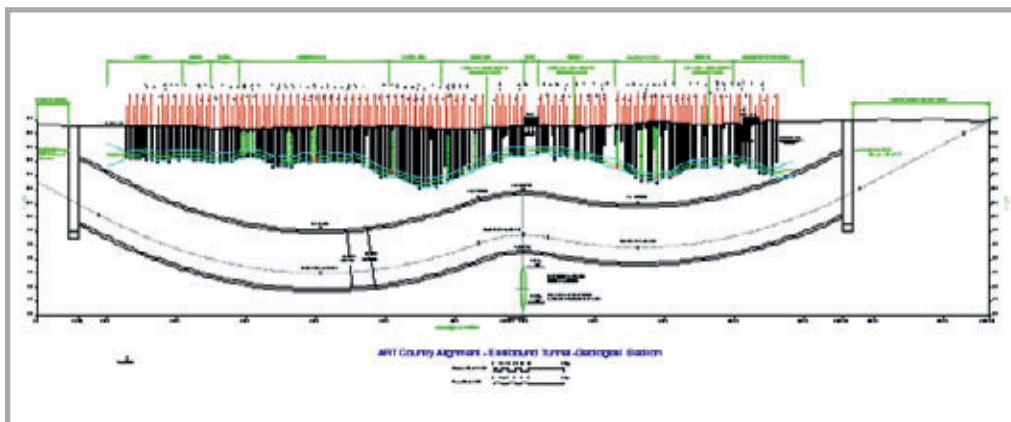


Figure 5
Profil en long de l'ART
Longitudinal profile of the ART



Photo 6
Chambre de démarrage
du tunnelier directement
au-dessous d'un stand
d'avion
*TBM starting chamber
directly below an aircraft
stand*

des stands à construire à l'ouest de l'aéroport. Ce premier tronçon devrait ensuite être prolongé jusqu'au terminal 5. Cet ouvrage à usage exclusif de véhicules de l'aéroport sera emprunté essentiellement par des bus assurant le transfert de passagers.

Après avoir exploré différentes options, la solution finalement retenue consiste, en :

- ◆ des ouvrages en tranchées couvertes aux deux extrémités assurant la connexion avec les routes en surface ;
- ◆ un bi-tube entre les deux.

Cette solution, essentiellement "tunnel" permettait de minimiser l'impact sur l'aéroport pendant la phase de construction. Le bi-tube permettait, lui, d'avoir des trafics unidirectionnels dans chacun des tunnels, limitant les risques d'accident, et offrant le confort opérationnel de pouvoir toujours maintenir un lien en activité pendant les périodes de maintenance dans l'un des tubes. Les points de départ et d'arrivée fixés, restaient à définir les alignements verticaux et horizontaux et le diamètre des tunnels. Les deux contraintes qui ont défini le diamètre intérieur étaient :

- ◆ la nécessité d'offrir une voie de roulement et une bande d'arrêt d'urgence permettant le dépassement d'un véhicule en panne dans le tunnel ;
- ◆ la nécessité de permettre le passage d'un bus à l'impériale !

Une chaussée de 6 m de large dans un tunnel de 8,10 m de diamètre permet de satisfaire ces deux contraintes (figure 3).

L'alignement horizontal du tunnel a essentiellement été dicté par une analyse de risques dans un contexte très particulier lié à l'histoire récente d'Heathrow. En effet, en 1994, un éboulement majeur s'est produit au cœur de l'aéroport lors de la construction de l'Heathrow Express, une ligne de métro. Depuis lors, BAA est particulièrement sensible aux risques associés à tout ouvrage souterrain. Pour ce lot de tunnels à creuser sous des taxiways et des stands d'avion opérationnels, la stratégie développée conjointement avec le client a consisté à maintenir en permanence une zone d'exclusion en surface, à la verticale du tunnelier. Dans cette zone de 30 m par 30 m, aucun trafic aéroportuaire (avions ou véhicules) ne sera permis. Cela implique, entre autres, la fermeture temporaire de stands d'avion, un problème opérationnel majeur pour l'aéroport qui déjà en temps normal souffre cruellement d'un manque de zones de stationnement d'avions au sol. Pour minimiser cette gêne, le tracé du tunnel a suivi au mieux les îlots herbeux en surface comme le montre la photo satellite (photo 4). L'alignement vertical a été dicté par :

- ◆ les contraintes géométriques correspondant aux deux lignes de métro que le tracé croise ;
- ◆ la contrainte du client de ne pas avoir de pentes dépassant les 1/19 pour permettre l'usage futur de véhicules électriques.

La combinaison de ces deux exigences associées au souci d'avoir un maximum de couverture a résulté dans le profil en "W" finalement adopté (figure 5).

In fine, la principale caractéristique de ces deux tubes de 1 250 et 1 290 m de long sont leur couverture relativement faible variant de 5 à 15 m pour un diamètre excavé de 9,20 m, l'ensemble devant être construit sous l'un des plus importants aéroports au monde.

Un impératif pour la construction : minimiser les tassements !

La géologie

La lithologie rencontrée le long du tracé est la suivante :

- ◆ sur une épaisseur variable de 0,35 m à 5,50 m des remblais, les surprofondeurs correspondant à d'anciennes zones d'extraction au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle des matériaux graveleux sous-jacents ;
- ◆ occasionnellement une fine couche (0,80 m maxi) d'argile sableuse d'origine alluviale ;
- ◆ une des formations caractéristiques du bassin londonien "Terrace Gravels", graves sableuses denses à très denses sur une épaisseur variable de 1,20 m à 4,30 m. Au plan hydrogéologique les "Terrace Gravels" contiennent une nappe perchée dont le niveau se situe entre 2 et 2,5 m sous la surface du terrain naturel ;
- ◆ enfin, sur une épaisseur d'une cinquantaine de mètres, la célèbre argile de Londres, argile grise-bleue à grise, raide à très raide. Cette argile peut présenter localement des concrétions carbonatées plus dures ("claystones") en niveaux subhorizontaux de faible épaisseur. On peut également y rencontrer de fines couches de baryte, de glauconite et des nodules phosphatés.

A proximité des "Terrace Gravels" se développe dans cette argile une frange d'altération de couleur orangée d'épaisseur moyenne 0,4 m à 0,95 m, pouvant atteindre localement deux mètres et s'accompagnant d'une réduction des caractéristiques mécaniques de l'argile.

L'argile présente une augmentation graduelle de sa cohésion non drainée avec la profondeur passant de 50 - 60 KPa à l'interface avec les graviers à plus de 200 KPa 20 m au cœur de la couche. Dans la section considérée pour le tunnel on peut estimer la cohésion non drainée entre 100 et 150 KPa.

L'argile de Londres est une argile surconsolidée par le poids d'importants dépôts alluvionnaires sous-jacents aujourd'hui disparus et à ce titre elle présente une anisotropie des contraintes verticales et horizontales, ces dernières étant manifestement plus fortes. Le rapport entre la contrainte horizontale et la contrainte verticale est classiquement estimé entre 1 et 1,5 (il tend vers 1 avec la profondeur).

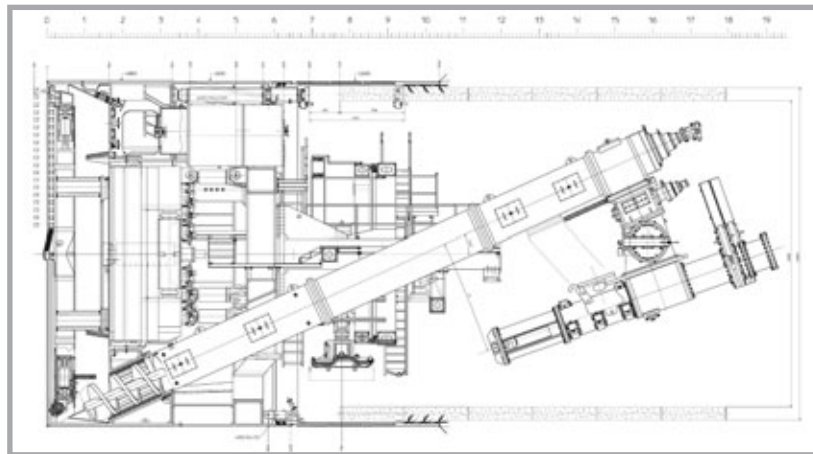


Figure 7
Coupe en long du tunnelier avec pompe Putzmeister en sortie de vis
Longitudinal section of the TBM with Putzmeister pump at screw conveyor exit

L'intégralité du tracé se situe dans l'argile de Londres avec aux deux extrémités le risque d'intercepter la couche d'argile altérée voire de rentrer au contact de la couche de graviers aquifère.

Les tassements maximums autorisés

Les zones de stationnement d'avions ainsi que les taxiways sont construits sur des contraintes maximales de pente de respectivement 1 pour 60 et 1 pour 100, impératives pour l'aéroport. Le tracé du tunnel intercepte aussi le tracé de conduites de kérosène qui sont généralement sur des pentes de 1 pour 500. Il était donc essentiel de pouvoir contrôler les mouvements de surface (soulèvements et tassements) dans les limites jugées acceptables à 20 mm (photo 6).

Le tunnelier

Pour assurer le confinement de la face tout en exploitant au mieux l'imperméabilité de l'argile de Londres, le choix de l'air comprimé s'est imposé après différents essais conduits avec Herrenknecht. Cependant, l'air comprimé n'offrait pas une solution applicable pour les zones de démarrage et d'arrivée où la voûte du tunnel risquait d'intercepter la couche de graviers. Finalement, le chantier commanda à Herrenknecht un tunnelier capable de fonctionner en deux modes : pression de terre et air comprimé.

La particularité du tunnelier, très classique par ailleurs, est la présence d'une pompe en sortie de vis. En effet, les essais en usine avaient démontré qu'il n'était pas possible de garantir la formation d'un bouchon étanche dans la vis d'extraction, apte à résister à une pression d'air de 2 bars, en extrayant l'argile de Londres sans aucun traitement. Par ailleurs, les essais avaient démontré la difficulté de transformer cette argile en une "pâte", possible mais extrêmement gourmand en énergie. Le choix fut donc d'installer une pompe en sortie de vis. Les matériaux transitent à travers cette pompe qui, avec ses deux pistons, assure les fonctions d'un sas et permet de maîtriser le débit de fuite d'air à travers la ligne d'extraction (figure 7 et photo 8).



Photo 8
Tête de coupe du tunnelier
TBM cutting head

Tableau II
Performances en termes d'avancement et de tassement de surface
Performance in terms of progress and surface subsidence

	1 ^{er} tube	2 ^e tube
Avancements		
Moyenne journalière (tunnelier en configuration définitive)	11,7 m/jour	14,9 m/jour
(anneaux / mètres)		
Meilleur jour	13 / 22.1	15 / 25.5
Meilleure semaine	80 / 136	79 / 134
Meilleur mois	250 / 425	234 / 398
Tassements de surface		
Proportion de points dans la limite de ± 10 mm	89%	82%
Tassement maximum	17 mm	20 mm

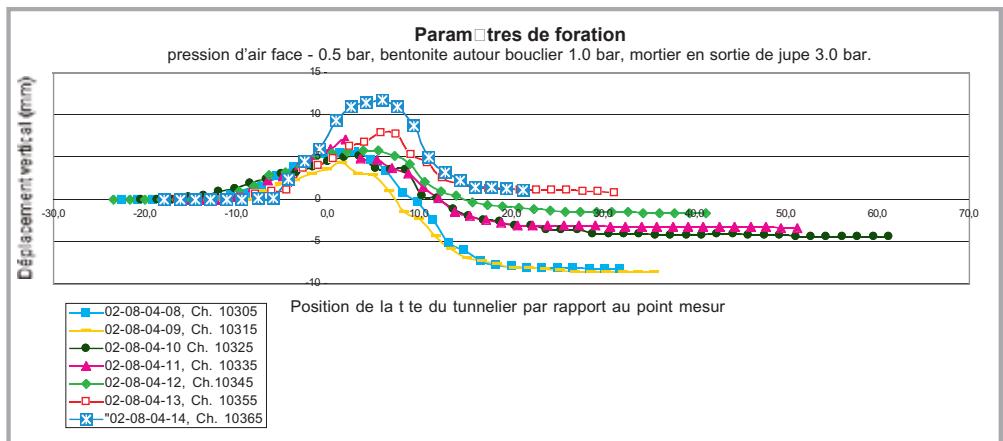


Figure 10
Graphe donnant l'évolution du mouvement en surface lors du passage du tunnelier
Chart showing the change in surface movement during passage of the TBM

Par ailleurs, les principales caractéristiques de "Belinda" étaient :

- ◆ diamètre excavé : 9,160 mm ;
- ◆ longueur bouclier : 10 360 mm ;
- ◆ poids bouclier : 750 t ;
- ◆ nombre de remorques : 6 ;
- ◆ longueur totale : 80 m ;
- ◆ poussée : 6 930 t via 14 paires de vérins ;
- ◆ couple maxi : 1 720 t.m, déblocage : 2 078 t.m, 7 moteurs de 400 kW ;
- ◆ puissance totale embarquée : approximativement 4 800 kW.

Deux véhicules sur pneus, spécialement conçus, assuraient l'approvisionnement des voussoirs et du mortier entre la surface et le tunnelier alors que le marinage était évacué par convoyeur continu.

Le creusement

Le creusement du tube nord (1 250 m) fut réalisé entre le 22 juin et le 16 décembre 2002, celui du tube sud (1 297 m) entre le 23 février et le 22 juin 2003 en travaillant sept jours sur sept, 24 heures sur 24.

Si la mise au point de ce nouveau concept de pompe fut difficile et pénalisa lourdement les avancements au tout début du premier tube, le procédé s'avéra parfaitement adapté au matériau et efficace pour le contrôle des tassements. La pression d'air à la face fut maintenue entre 0,5 et 1 bar sur l'essentiel du tracé, très localement augmentée à 2 bars.

Pendant toute la durée du creusement, les données mesurées en surface ont été quotidiennement analysées pour adapter les paramètres de confinement sur le tunnelier.

Les performances obtenues, tant en terme d'avancement que de tassements en surface, sont résumées dans le tableau II.

D'une manière générale, au passage du tunnelier, les mouvements suivants ont été enregistrés en surface :

- ◆ un soulèvement d'environ 5 mm à l'approche du tunnelier ;
- ◆ un tassement de 10 mm le long de la jupe ;
- ◆ et enfin un soulèvement au droit de l'injection de bourrage de mortier ramenant le point proche de son zéro.

Le tassement final est obtenu environ 30 à 40 m derrière la machine (figure 10).

PICCEX ET HEXEX – DEUX LIGNES DE MÉTRO À PROLONGER

Heathrow est desservi par deux lignes de métro :

- ◆ la Piccadilly Line, ligne omnibus, qui passe en boucle souterraine sous l'aéroport, dessert une station au terminal 4, une station commune aux terminaux 1, 2 et 3 avant de repartir vers Londres ;
- ◆ l'Heathrow Express qui relie l'aéroport au centre de Londres en 15 minutes.

Ces deux liaisons doivent être prolongées en souterrain jusqu'à une nouvelle station incorporée au terminal 5. Dans les deux cas, la solution retenue est un bi-tube. Les travaux confiés au groupement incluent aussi les ouvrages annexes : puits d'accès et d'intervention, puits de ventilation, rameaux de connexion entre tubes principaux. Les principales quantités correspondant à ces lots ferroviaires sont résumées dans le tableau III.

Une technique simple permettant des avancements records pour les tubes principaux

Les tubes principaux s'inscrivent à 20 m de profondeur, dans l'argile de Londres. Compte tenu de leur profondeur et de leur faible diamètre, la solution traditionnelle dans l'argile de Londres d'excavation avec un bouclier ouvert et de mise en place d'un revêtement "wedge block lining" à l'arrière du bouclier est parfaitement adaptée. Les deux boucliers ont été commandés chez Dosco, un fabricant anglais, spécialisé dans ce type de matériel (photo 11).

La technique du "wedge block lining" consiste à poser un anneau formé de voussoirs en béton (ou parfois en fonte), en sortie de jupe du tunnelier, directement au contact du terrain. L'anneau comporte une clé, plus courte que les autres voussoirs,

utilisée comme un coin (d'où l'appellation "wedge block") forçant l'anneau contre le terrain. Cette technique ne nécessite pas d'injection de mortier de bourrage autour de l'anneau. Il est bien évident qu'elle n'est applicable que dans des terrains suffisamment stables et imperméables. L'ensemble du processus d'excavation et de montage de l'anneau devient alors extrêmement simple techniquement et permet des avancements tout à fait remarquables. Ainsi, le meilleur avancement journalier sur l'émissaire de 2,91 m de diamètre intérieur construit par le groupement sur T5 a été de 72 m, 46,8 m/jour en moyenne pendant la période où le tunnelier était en configuration définitive. Une autre conséquence de ce mode d'excavation est que les efforts de poussées du tunnelier sur le revêtement sont minimes. Ainsi, les voussoirs installés à l'arrière de ces machines ne sont pas ferrillés de manière conventionnelle avec des cages d'armatures mais avec des fibres métalliques à un dosage de 40 kg/m³ réduisant très significativement le coût de fabrication des voussoirs.

Le premier tunnelier, livré sur chantier le 13 octobre, a entamé le creusement du tube sud de PiccEx le 26 octobre 2003. Après avoir construit les soixante premiers anneaux, le tunnelier pourra être mis dans sa configuration complète avec toutes les remorques de son train suiveur. L'objectif sera alors de réaliser les 34 m moyens d'avancement quotidien inscrits au programme tout en respectant les tolérances de construction extrêmement serrées de ± 45 mm imposées sur ce tunnel. La même machine sera réutilisée pour le creusement du second tube. Dans le même temps, un second tunnelier est en cours de fabrication dans les ateliers de Dosco avec une date de livraison prévue sur site début janvier 2004.

Du béton projeté en revêtement permanent sur les ouvrages annexes

Les structures associées à ces tunnels principaux (puits de ventilation, d'intervention, rameaux d'interconnexion) sont des structures complexes où la difficulté principale réside dans les nombreux changements de section et dans les raccordements entre puits verticaux et rameaux horizontaux, entre rameaux horizontaux et tunnels principaux construits au tunnelier comme décrit ci-dessus (figure 13). L'excavation de ces ouvrages ne pouvait se réaliser qu'en adoptant des méthodes dites "traditionnelles" : excavation à l'aide de pelle hydraulique et revêtement en place.

La solution classique de revêtement aurait consisté en la mise en place d'un revêtement temporaire en béton projeté, recouvert d'un revêtement permanent de béton armé coffré coulé en place. Cette solution s'accommodait mal de la complexité des structures et nécessitait la fabrication d'un

	Longueur	Diamètre intérieur	Epaisseur revêtement	Volume excavé
Tunnels principaux				
PiccEx	1 634 m (nord) 1 650 m (sud)	4,50 m	15 cm	59 674 m ³
HExEx	1 791 m (nord) 1 421 m (sud)	5,68 m	22 cm	94 641 m ³
Ouvrages annexes				
Puits	208 m	6 m min. 12,5 m max.	35 cm à 1 m	16,228 m ³
Rameaux (au total)	380 m	4 m min. 6,2 m max.	30 cm à 1 m	7,293 m ³

Tableau III
Caractéristiques des lots ferroviaires
Characteristics of the railway work sections



Photo 11
Tunnelier PiccEx pendant son installation dans le puits de démarrage

PiccEx TBM during its installation in starting shaft

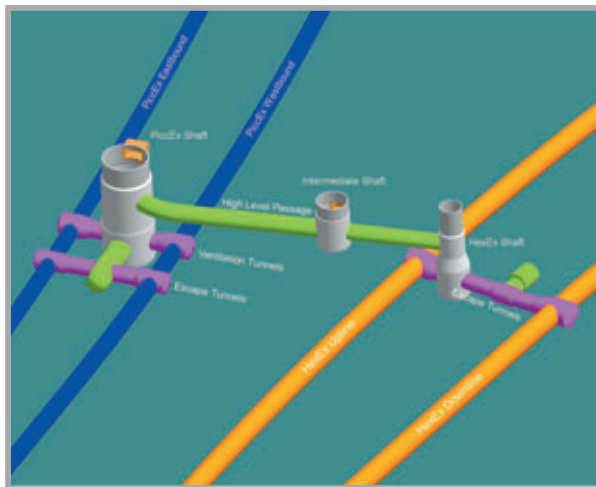


Figure 13
Vue 3D de l'un des puits d'intervention sur lots ferroviaires

3D view of one of the shafts for railway work

grand nombre d'outils coffrants à usage unique. La décision fut donc prise de développer une solution basée sur l'emploi d'un revêtement en béton projeté en revêtement définitif.

Dans le même temps où l'équipe abordait cette phase d'études sur T5, les partenaires du groupement construisaient un lot de tunnel sur le projet de CTRL (raccordement grande vitesse pour l'Europe entre Londres et le tunnel sous la Manche) et se trouvaient confrontés à un sérieux accident du travail : un mineur était gravement blessé pendant la pose d'un cintre à l'avancement du tunnel. Conciliant ces différentes considérations, une mission fut confiée à Beton und Monierbau (Bemo) – société autrichienne spécialisée en travaux sou-

Photo 14
"Beamer" utilisé à la face pour contrôler la projection de béton
Beamer used at the face to control concrete spraying



Figure 15
Principe de la méthode "lasershell"
Principle of the Laser Shell method

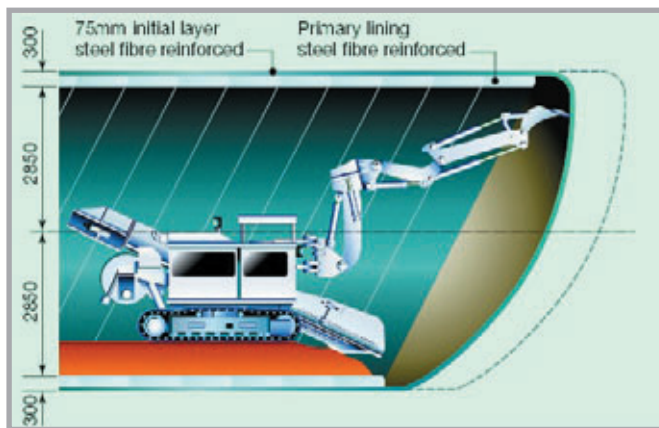


Photo 16
Amorces de galeries démarrant depuis un puits
Beginning of galleries starting from a shaft



terrains traditionnels et partenaire dans le groupement CTRL – pour développer une méthode de construction qui :

- ◆ s'affranchirait totalement du besoin de placer du personnel à la face du tunnel ;
- ◆ permettrait de construire un revêtement définitif en béton projeté à l'avancement.

L'argile de Londres, au moins pour des sections correspondant aux tunnels à construire en traditionnel sur T5, est essentiellement stable et ne demande pas la mise en place d'un soutènement mécanique lourd, type cintres. Les interventions humaines à la face sont donc potentiellement réduites à celles :

- ◆ des géomètres pour vérifier le profil excavé ;
- ◆ des mineurs pour la pose de cintres légers réti-

culés utilisés comme gabarit de contrôle pour la mise en place du béton projeté.

Le "Beamer", un outil topographique fut spécialement développé. Il permet de visualiser dans les trois dimensions, en temps réel, sur un ordinateur portable à la face, la comparaison entre profils théoriques et réalisés aussi bien pendant la phase excavation que pendant la phase projection du revêtement. Dans nos tunnels dont le soutènement n'est assuré qu'avec du béton projeté fibré, le "Beamer" élimine ainsi tout besoin d'accéder à la face (photo 14).

La seconde partie de la mission a principalement consisté à convaincre l'équipe du projet, y compris maîtrise d'œuvre et client que l'on pouvait raisonnablement garantir une durée de vie de 120 ans avec un revêtement en béton projeté placé à l'avancement. Deux principaux points restaient délicats :

- ◆ la qualité des joints entre passes successives ;
- ◆ l'impact à long terme de la sollicitation très forte à jeune âge du béton projeté.

De nombreux essais de laboratoire en Angleterre et en Autriche ont permis de répondre une à une aux différentes questions très théoriques posées. La méthode finalement adoptée, appelée "lasershell" consiste :

- ◆ à avancer par passe de 1 m, en pleine section, en maintenant la face inclinée à 30° environ par rapport à la verticale ;
- ◆ à projeter un revêtement en trois passes qui typiquement dans un tunnel de 4 m de diamètre intérieur sont deux couches de béton fibré (une couche initiale de 75 mm, une couche principale de 200 mm) et une couche de finition talochée à la main de béton projeté non fibré (épaisseur 50 mm) (figure 15). Le premier tronçon de tunnel a été construit en adoptant cette méthode en janvier 2003. Il a permis de la valider et d'identifier quelques points à améliorer. Depuis, cette méthode a été appliquée pour la construction de différents ouvrages de façon tout à fait satisfaisante, en simplifiant notamment de façon radicale les phases de construction des nombreuses intersections (photo 16).

■ PRÉFABRICATION DES VOUSOIRS

Des voussoirs coulés sur la tranche

Pour construire les quelque 104 000 voussoirs en béton constituant les revêtements des différents tunnels (voir détail tableau IV), le groupement a développé sa propre usine de préfabrication.

Deux principaux facteurs ont motivé la décision d'établir une unité de production indépendante plutôt que d'utiliser les fournisseurs existants :

- ◆ la qualité recherchée ;
- ◆ la flexibilité et la sécurité d'approvisionnement.

Comme expliqué plus haut, une technique extrêmement conventionnelle de construction de tunnels en Angleterre est l'usage de "wedge block lining". Généralement, il s'agit d'anneaux à face parallèles. Les courbes dans les tunnels sont assurées par des calages entre anneaux successifs à l'aide de morceaux de contre-plaqué ! On comprend bien que cette technique s'accommode de tolérances de construction des voussoirs très larges, de l'ordre de plusieurs millimètres. Les fournisseurs de voussoirs en Angleterre ont donc, au cours des années, développé leur technique de fabrication pour répondre de façon économique à ces besoins. Ainsi, en 2000, tous les voussoirs produits en Angleterre étaient coulés "sur la tranche". Cette technique de préfabrication tout à fait pertinente pour les lots ferroviaires et émissaire ne permet pas d'assurer la qualité dont le projet avait besoin pour la construction de l'Airside Road Tunnel.

En 2000, le programme de réalisation des différents lots de tunnels risquait d'être – et a été – soumis à de nombreuses modifications. Par ailleurs, la réalisation des tunnels pour T5 allait intervenir de façon concomitante avec la construction des différents lots de tunnels pour la mise à grande vitesse de l'Eurostar jusqu'au centre de Londres. Avoir une usine indépendante permettait d'assurer à la fois la sécurité et la flexibilité d'approvisionnement dont le projet avait besoin.

Après avoir identifié un terrain disponible avec tous les différents permis de développement requis, le groupement démarre en février 2001 la construction d'une usine de préfabrication pouvant abriter deux lignes de production. La première ligne de production est mise en route en mars 2002 pour produire les voussoirs de l'Airside Road Tunnel, la seconde en juin 2003 pour produire simultanément les voussoirs des deux lots de tunnels ferroviaires. A fin novembre 2003, 74 % des voussoirs étaient fabriqués (photos 17 et 18).

■ UN CADRE CONTRACTUEL INNOVANT

Pour réaliser son projet d'une valeur de 5,2 milliards d'euros, sur 5 ans, BAA, client privé, coté à la bourse de Londres, a poussé à son maximum la logique des contrats de "partnering" couramment utilisés Outre-Manche. Le principe de base du contrat T5 est en effet que tous les risques sont pris par le client, les entreprises étant rémunérées de leurs coûts réels augmentés d'un pourcentage de profit. La centaine d'entreprises participant au projet – essentiellement bureaux d'études et d'ingénierie, entreprises de construction (gros œuvre, second œuvre ou électromécanique) et consultants – ont toutes été sélectionnées sur leurs références techniques et leur aptitude à travailler en partenariat. Le groupement formé de VINCI Construction Grands

	Anneaux	Voussoirs	Béton (m ³)
ART	1 540	12 320	24 332
HexEx	3 325	33 250	13 533
PiccEx	3 190	25 520	7 465
SWOT	4 090	32 720	8 753
Total			54 083

Tableau IV
Revêtement
des différents tunnels
*Lining of the various
tunnels*



Photos 17 et 18
Moules utilisés
pour les voussoirs ART,
coulés "face en bas"

*Moulds used for the ART
segments,
cast "face down"*



Projets et de Morgan=est fut ainsi retenu pour réaliser tous les tunnels associés à la construction du terminal 5.

Ces entreprises sont ensuite regroupées par sous-projet réalisant des parties de l'ouvrage en conception-construction. Par exemple, l'Airside Road Tunnel rassemble Mott MacDonald (bureau d'études génie civil et électromécanique), Laing O'Rourke (construction des tranchées couvertes), Morgan=VINCI (construction des tunnels) et Amec (équipements électromécaniques de l'ensemble). En fin de la phase d'études, les entreprises et le client se mettent d'accord sur un programme et un coût objectif (y compris provision pour risques), pour la réalisation du sous-projet. Dans le même temps, chaque entreprise voit son profit forfaitisé.

Si l'ouvrage est réalisé dans le programme et dans le budget, l'économie réalisée est répartie entre les différents intervenants et constitue un super-profit. Si dépassement, le client paye les coûts. Les différents niveaux de motivation des intervenants peuvent se résumer comme suit :

◆ les entreprises de construction impliquées très tôt dans la phase "études" ont ainsi l'opportuni-

► té de proposer les variantes à des bureaux d'études traditionnellement tout-puissants en Angleterre ;

◆ les différents participants ont un intérêt commun à résoudre au mieux les interfaces pour réaliser le sous-projet dans les délais et le budget et se partager ainsi un bonus ;

◆ chaque entreprise participant au sous-projet a intérêt à réduire ses coûts pour que le profit forfaitisé en valeur absolue augmente en pourcentage.

Par-dessus tout, l'objectif du client est de placer tous les intervenants dans une position où la priorité n'est pas de défendre des intérêts particuliers qui sont raisonnablement protégés mais bien de concentrer toute leur énergie et leurs efforts à l'optimisation du projet.

Sur un projet hors normes comme T5 (5,2 milliards d'euros d'investissements sur 10 km²) où il s'agit en 6 ans de concevoir et construire un ouvrage extraordinairement complexe, aux multiples interfaces, cette approche a déjà fait ses preuves en assurant qu'à 25 % d'avancement, les travaux sont globalement en phase avec le programme objectif.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS TERMINAL 5 – HEATHROW

• Maître d'ouvrage : BAA

Lots : construction tunnels

- Maîtrise d'œuvre : Mott MacDonald
- Construction tunnels : groupement Morgan=est - Vinci Construction Grands Projets (50/50)
- Construction tranchées couvertes : Laing O'Rourke
- Electromécanique : Amec
- Systèmes ferroviaires : Balfour Beatty
- **Valeur** : 5,2 milliards d'euros

ABSTRACT

**Tunnels for the A380.
14 km of tunnels to be
constructed in four years
under Heathrow**

J.-L. Audureau, S. Thacker, I. Williams

As part of the construction of a fifth terminal at Heathrow, Vinci Construction Grands Projets, in partnership with Morgan Est, is constructing more than 14 km of tunnels under one of the biggest airports in the world. To adapt to the specific site constraints and the airport environment, the work team had to develop special techniques, and in particular a dual-mode compressed air and Earth Pressure Balance TBM and a method allowing a permanent lining of shotcrete to be put in place as work progresses as described in this article. The extremely innovative contract adopted by the Owner to conduct a capital spending programme worth over 5 billion euros is one of the remarkable features of this project.

RESUMEN ESPAÑOL

**Túneles para la autopista
A380. 14 km de túneles
a construir en 4 años bajo
Heathrow**

J.-L. Audureau, S. Thacker e I. Williams

Actuando en el contexto de la construcción de un quinto terminal en Heathrow, Vinci Construction Grands Projets, en asociación con Morgan = est, ha ejecutado más de 14 km de túneles bajo uno de los más importantes aeropuertos del mundo. Para adaptarse a los requerimientos particulares del emplazamiento, así como al entorno aeroportuario, el equipo de ejecución de las obras ha tenido que desarrollar técnicas especiales, y, fundamentalmente, una tunelera bimodo de presión de aire y presión de tierra, así como un método que permite la aplicación de un revestimiento permanente de hormigón proyectado según se va avanzando como así figura presentado en este artículo. La naturaleza del contrato, particularmente innovador, que ha sido implementado por el director de las obras para llevar a buen término una inversión de cinco mil millones de euros, constituye una de las características más relevantes de este proyecto.

Le tunnel TGV du Groene Hart

Un ouvrage exceptionnel qui ouvre de nouvelles perspectives

Le projet de Groene Hart aux Pays-Bas fait partie de la future voie ferrée à grande vitesse qui reliera Amsterdam à la Belgique et au-delà à l'ensemble du réseau ferré grande vitesse européen. L'article décrit les points clés de la conception de ce tunnel monotube d'un diamètre exceptionnel réalisé à l'aide d'un tunnelier à confinement bentonitique. En particulier, il explicite comment les principales difficultés fonctionnelles aussi bien que structurelles ont été considérées pour parvenir à la conception finalement retenue.

■ À CONTEXTE ORIGINAL SOLUTION EXCEPTIONNELLE

Le tunnel du Groene Hart est un maillon essentiel de la future ligne ferroviaire à grande vitesse qui reliera Amsterdam et Rotterdam.

Le choix d'enterrer la ligne, dicté par la valeur environnementale de ce "cœur vert" pour les Pays Bas, a conduit à un projet de traversée souterraine de plus de 7 km de long. La conjonction de la vitesse d'exploitation (300 km/h) et d'exigences élevées en matière de confort et de sécurité a conduit le maître d'œuvre (HSL) à exiger une section d'air importante, allant au-delà de l'espace strictement nécessaire pour les équipements, les phénomènes aérodynamiques étant dimensionnants.

La seconde caractéristique importante du projet est le contexte géotechnique difficile : le tunnel est principalement creusé dans le sable, sous une couche de tourbe de très faible densité, ce qui induit des risques d'instabilité, tant au niveau de la tenue du front que du soulèvement.

La solution proposée par le groupement Bouygues TP - Koop, à savoir un monotube de près de 15 m de diamètre constitue à la fois :

- ◆ un record du monde en termes de diamètre de tunnelier ;
- ◆ la résultante de multiples innovations ou adaptations qui ont rendu possible ce challenge ;
- ◆ une ouverture vers une nouvelle génération d'infrastructures souterraines de transport.

Le présent article (1) décrit le contexte et la solution de référence du client, puis la solution retenue en traitant successivement des aspects confort, sécurité et exploitation, et enfin géotechniques et structurels.

■ CONCEPTION DE RÉFÉRENCE

La conception de référence développée par HSL consistait en un double tube, comme l'illustre la fi-

gure 1. Le diamètre de chaque tube (9,5 m) conduisait à un petit peu plus de 60 m² de section d'air libre (enveloppe du train non compris), section réputée compatible avec les critères de confort pour les passagers, compte tenu de la présence de plusieurs puits de pistonement, incluant les trois puits d'évacuation positionnés tous les 2 km.

La distance intertube était d'une vingtaine de mètres. Des passages intertubes (au nombre de 23) d'un diamètre d'environ 4 m devaient être ménagés tous les 300 m sur l'ensemble du parcours. La réalisation de ces rameaux avait été identifiée par le client comme l'un des risques majeurs du projet, du fait des faibles caractéristiques géotechniques, qui nécessitaient a priori un traitement par congélation, et aussi du fait de l'interdiction d'accès en surface pour des questions liées à l'environnement.

C'est la raison pour laquelle HSL incitait les soumissionnaires à être innovants et imaginatifs dans la réalisation de ces rameaux, afin de réduire le profil de risque global du projet.

A l'évidence, le meilleur moyen de simplifier la réalisation des rameaux était de ne pas les faire, ce qui menait naturellement au concept du monotube.

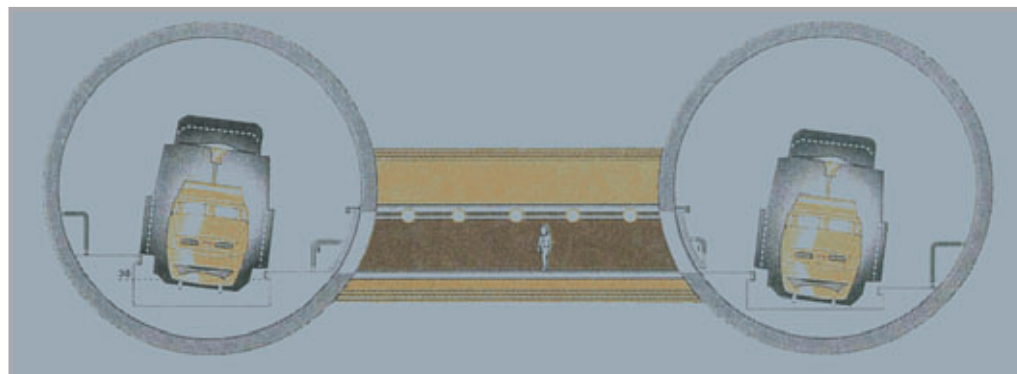


Figure 1
Solution de référence
Reference solution

(1) N.D.L.R. : Cette publication complète l'article de Joseph Harnois paru dans le n° 783 de *Travaux* en février 2002, pages 35 à 39.

Pierre Aristaghes

DIRECTEUR ÉTUDES
ET DÉVELOPPEMENT
Bouygues TP

Philippe Autuori

CHEF DE SERVICE ÉTUDES
ET DÉVELOPPEMENT
Bouygues TP

Valérie Blanchet

CHEF DE SERVICE ADJOINT ÉTUDES
ET DÉVELOPPEMENT
Bouygues TP

Jean-Paul Hémerly

CHEF DE SERVICE PROJETS
LINÉAIRES ET INDUSTRIELS
Bouygues TP

Pierre Longchamp

DIRECTEUR TECHNIQUE TRAVAUX
SOUTERRAINS
Bouygues TP

Figure 2
Solution
monotube
Single-tube
solution

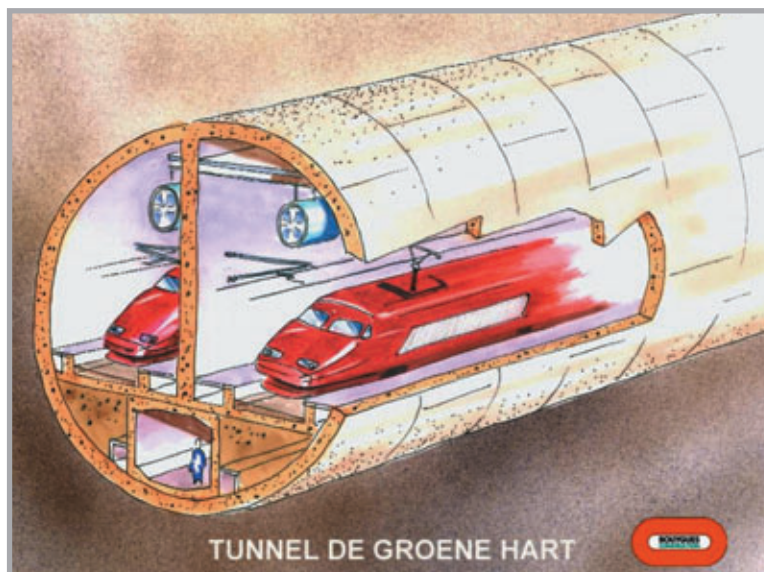
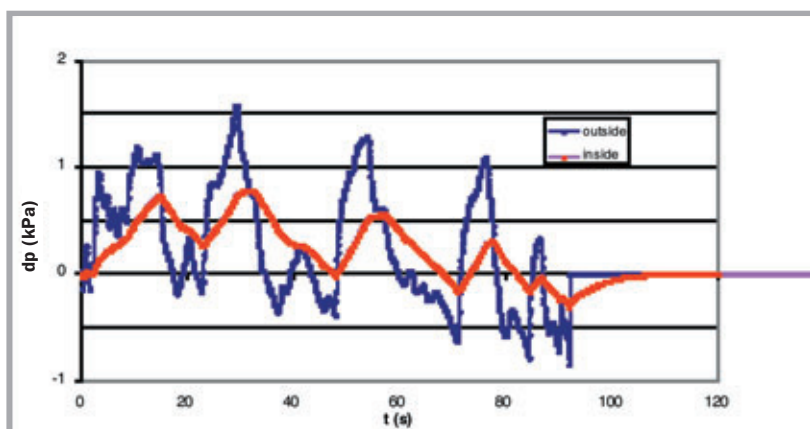


Figure 3
Variation des pressions
externes et internes
External and internal
pressure variations



HSL avait également emprunté cette voie à un stade très préliminaire. Cependant, pour conserver la section d'air requise et pouvoir loger tous les équipements (voies de dégagement, signalisation, ventilation, etc.), le diamètre de creusement minimum était de plus de 16 m. Outre le fait qu'un tel diamètre était nettement au-dessus de celui des plus gros tunneliers jamais utilisés dans le monde, les contraintes d'alignement vertical étaient incompatibles avec un tel diamètre.

Plus précisément, il y avait conflit avec les contraintes suivantes :

- ◆ tout d'abord, les faibles caractéristiques géotechniques (notamment la faible contrainte verticale en clé due à la faible densité des tourbes sus-jacentes) nécessitaient une couverture minimum (au-dessus de la clé), qui augmentait rapidement avec le diamètre D (en effet, la poussée d'Archimède augmente comme D², tandis que les forces résistantes sont à peu près proportionnelles à D);

- ◆ ensuite, afin d'assurer la continuité avec les lots adjacents, réalisés en surface, il n'était pas possible d'approfondir le niveau de rail, ce qui aurait permis de compenser la poussée d'Archimède tout en maintenant un grand diamètre, qui conduisaient à un diamètre maximum de l'ordre de 15 m, d'où conflit avec les 16 m requis par l'exploitation.

L'option monotube était donc inadaptée, sauf à réduire le diamètre en dessous de 16 m en revisitant

de manière globale les contraintes d'exploitation, ce qui fut fait durant la période de consultation, en transparence totale avec HSL.

La solution finalement retenue, qui s'est avérée nettement plus économique que la solution de référence, est illustrée par la figure 2.

Ses caractéristiques principales après design et optimisation sont les suivantes :

- ◆ deux "tubes" jumeaux, de 49 m² de section d'air libre chacun ;
- ◆ un mur central doté d'ouvertures en partie haute pour limiter le pistonement ;
- ◆ un passage de sécurité à travers le mur tous les 150 m, à comparer aux 300 m du projet de référence ;
- ◆ une galerie technique sous les voies, facilitant les opérations de l'exploitant ;
- ◆ des volumes de lest de part et d'autre de cette galerie, pour contrer le soulèvement.

■ ASPECTS LIÉS AU CONFORT

Revenant à l'expression intrinsèque des critères fonctionnels, et non plus à leur simple transcription en termes d'une surface d'air libre à respecter, transcription qui prenait implicitement en compte des éléments du design de référence, les critères à respecter étaient les suivants :

- ◆ critère de confort pour les passagers, se traduisant par une courbe $\Delta P_i = f(\Delta t)$ reliant la variation maximum de pression à l'intérieur du train P_i à l'intervalle de temps considéré ; un tel critère dépend de la qualité de l'étanchéité de la voiture, caractérisée par le temps pour qu'une surpression de 3 Pa tombe naturellement à 0,1 Pa ;
- ◆ critère de sécurité pour les passagers, exprimé par la variation maximum ΔP_e de la pression extérieure en 4 s, caractérisant une dépressurisation accidentelle d'une voiture ;
- ◆ critère de sécurité pour le personnel d'exploitation travaillant sur la voie adjacente, caractérisée par la variation maximale ΔP_a de la pression sur la voie adjacente en moins de 4 s, et par une vitesse maximale du "vent" induit ;
- ◆ résistance à la fatigue du train, exprimée par l'écart maximal ($P_e - P_i$) entre pressions externes et internes.

Sur la base de ces critères, des calculs aérodynamiques ont été menés, prenant en compte l'infrastructure dans sa globalité (tubes et sections d'extrémité en tranchée couverte, dalle supérieure anti-sonic boom, puits de pistonement, ouvertures dans le voile central...), ainsi que les trains (géométrie, coefficients aérodynamiques, étanchéité). La figure 3 montre des courbes de pression typiques (en bleu la pression externe P_e , en rouge la pression interne P_i).

Cette étude, menée durant la période d'appel d'offres, a permis de justifier une section de 49 m², donc de

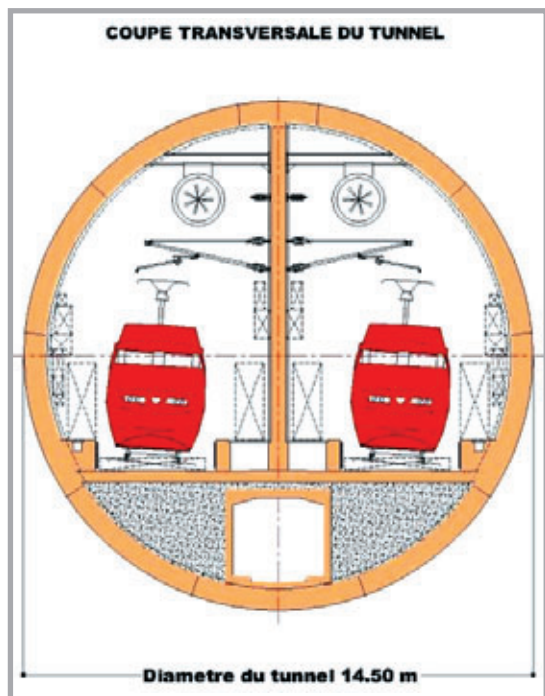


Figure 4
Coupe type
Typical cross section

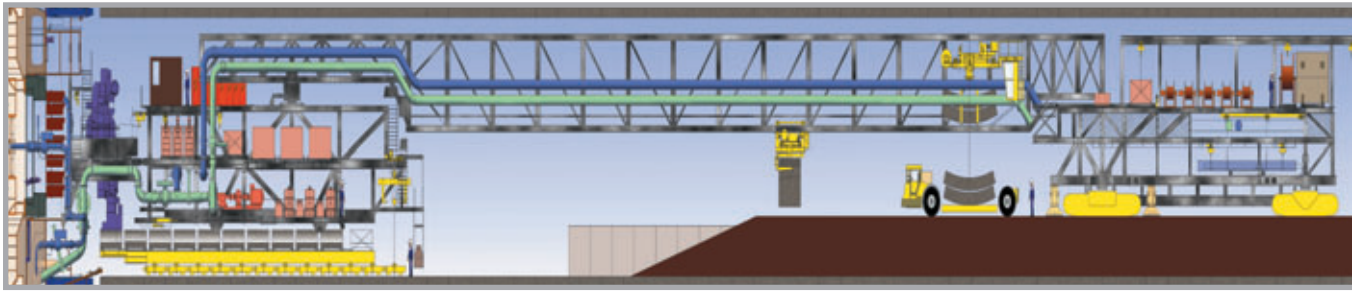


Figure 5
Train suiveur et mode
de réalisation
des structures internes
Follower train and
construction technique
for internal structures

résoudre le conflit décrit plus haut en revenant à un diamètre de creusement inférieur à 15 m.

Ceci n'a pu être obtenu qu'en repensant le projet dans sa globalité (optimisation des puits, des perforations dans la voile, équipements, sécurité), y compris vis-à-vis de l'environnement, puisque les vitesses d'échappement d'air dans les puits ont nécessité le redimensionnement des atténuateurs acoustiques placés en tête de puits, afin de respecter les niveaux sonores en surface.

■ SÉCURITÉ ET ASPECTS OPÉRATIONNELS : L'IMPACT DU CONCEPT MONOTUBE

Le principal atout du concept monotube en termes de sécurité est le nombre accru de possibilités de passage d'un "tube" à l'autre en cas d'incident sur une voie : une porte est en effet positionnée tous les 150 m, au lieu d'un rameau tous les 300 m. Comme on peut le voir sur la figure 4, ces portes peuvent être atteintes par les passagers via des trottoirs d'évacuation installés de part et d'autre du mur central.

Des voies piétonnières additionnelles sont réservées côté extérieur, ceci pour les opérations de maintenance.

Le concept de monotube fournit également une galerie technique, totalement indépendante des espaces offerts à la circulation, dans laquelle la quasi-totalité des équipements électromécaniques est installée, offrant ainsi une sécurité et un confort d'intervention accrus, les agents d'exploitation pouvant accéder aux équipements et travailler au calme 24 heures sur 24, sans attendre que l'une des voies soit libre ou mise hors circulation.

Ceci constitue un avantage majeur pour l'exploitant, le tunnel du Groene Hart constituant une première en ce domaine, qui devrait être suivie par de nombreux projets similaires.

■ CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET ASPECTS STRUCTURELS

Le tunnel du Groene Hart est foré dans des formations sableuses, localement argileuses. Le long des 7 200 m de creusement, la couverture varie de un à deux diamètres, sauf aux extrémités nord et sud.

Du fait du diamètre exceptionnel, la stabilité au soulèvement sous l'effet de la poussée d'Archi-

mède, ainsi que le dimensionnement des rampes d'accès, deviennent rapidement critiques dès que l'on relève le profil. En fait, même après achèvement des structures internes, la faible contrainte verticale en clé près des extrémités ne permet pas d'obtenir la sécurité requise sans traitement du terrain, consistant en une substitution des couches de mauvaise qualité par un matériau cohérent de plus forte densité que le sol en place.

Au voisinage de chacune des extrémités, la couverture n'était pas encore suffisante pour assurer la stabilité au soulèvement tant que les structures internes, et notamment le ballast situé de part et d'autre de la galerie technique, n'étaient pas construites. Ceci a conduit à concevoir, dès la phase de préparation des offres, un process de creusement innovant, où le train suiveur roule sur les structures internes construites de manière industrielle à une trentaine de mètres du tunnelier. Sur la base de calculs prenant en compte l'effet poutre du tube, le train suiveur a été conçu de manière à ce que l'on puisse construire la galerie technique et le remplissage sable-ciment entre les deux portiques. Le premier roule sur le revêtement final, tandis que le second roule sur le sable-ciment (figure 5).

Un mode de creusement avec confinement à la boue a été adopté pour ce tunnelier de 14,9 m de diamètre (cf. description plus complète du tunnelier en réf. 7). La capacité de confinement a été définie sur la base d'analyses de sensibilité des tassements vis-à-vis de la pression de confinement, fondées sur le concept original de Coefficient d'efficacité du confinement développé par Bouygues TP (réf. 1 à 4).

Des calibrations régulières sont effectuées, sur la base des pressions de confinement réellement appliquées sur chaque anneau, tirées du système de traitement de données Catsby (réf. 5).

Le revêtement est constitué de voussoirs offrant des joints plats, avec concept de transfert d'efforts isostatique, expérimenté avec succès et régulièrement amélioré par Bouygues TP depuis plusieurs années (réf. 6). L'épaisseur est de 60 cm, pour un béton B62 avec un ratio d'armatures de l'ordre de 90 kg/m³.

Il a été calculé en tenant compte des charges dynamiques dues au passage des trains à grande vitesse, ainsi que du process original de creusement décrit plus haut. Un modèle spécifique prenant en compte les effets de poutre, a été utilisé pour optimiser les lests à mettre en place et la rhéologie de produit de bourrage, dont le blocage risquait

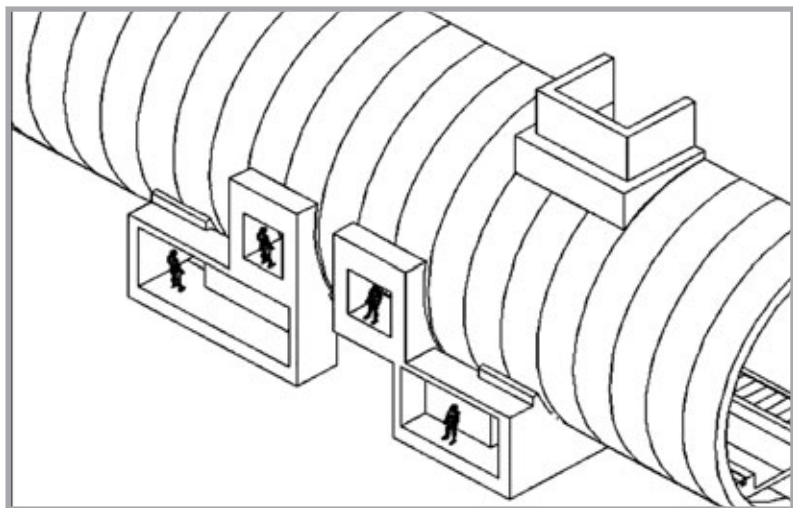


Figure 6
Revêtement au droit des puits de secours
Lining in the emergency shafts

d'être moins efficace que pour des ouvrages classiques, du fait de l'épaisseur importante du vide annulaire.

Par ailleurs, des modélisations tridimensionnelles ont été effectuées pour optimiser les ouvertures dans le revêtement au droit des trois puits de secours comme l'illustre la figure 6.

CONCLUSION

Concevoir dans sa globalité un tel tunnel, exceptionnel tant par son diamètre (qui représente toujours à ce jour un record du monde) que par le caractère innovant de son concept et de son mode de réalisation, s'est révélé à la fois "challenging" et enthousiasmant.

Ce travail de conception, allant jusqu'aux études d'exécution, a clairement contribué à élargir le savoir-faire et la technicité des équipes d'études, qui ont été régulièrement confrontées à des situations inédites.

Au-delà, un tel ouvrage ouvre la voie à de nouvelles possibilités pour les infrastructures souterraines à venir.

RÉFÉRENCES

- [1] Aristaghes P., Autuori P., "Connection calculation and driving", ITA, Sao Paulo, 1998.
- [2] Aristaghes P., Autuori P., "Calcul des tunnels au Tunnelier", *RevFrGéotech*, 2001.
- [3] AFTES : Convergence Confinement, 2002.
- [4] Aristaghes P., Autuori P., "Confinement Efficiency Concepts", ITA, Amsterdam, 2003.
- [5] Aristaghes P., Blanchet V., "Catsby Signal Aided Boring", ITA, Sao Paulo 1998.
- [6] Aristaghes P., Autuori P., "Lining Design Philosophy", Workshop, Delft, 2002.
- [7] Longchamp P., "Le tunnel de Groene Hart", *Tunnels et souterrains*, jan-fév 2003.

ABSTRACT

The Groene Hart high-speed train tunnel. An exceptional structure opening up new perspectives

P. Aristaghes, Ph. Autuori, V. Blanchet, J.-P. Hémerly, P. Longchamp

The Groene Hart project in the Netherlands forms part of the future high-speed rail line that will link Amsterdam to Belgium and beyond that to the entire European high-speed rail network. The article describes the key aspects of the design of this single-tube tunnel of exceptional diameter constructed using a bentonite slurry TBM. In particular, it explains how the chief difficulties, both functional and structural, were considered in order to reach the design finally adopted.

RESUMEN ESPAÑOL

El túnel de alta velocidad del Groene Hart. Una estructura excepcional que desemboca hacia nuevas perspectivas

P. Aristaghes, Ph. Autuori, V. Blanchet, J.-P. Hémerly y P. Longchamp

El proyecto del Groene Hart, en Holanda, forma parte integrante de la futura vía férrea de alta velocidad que pondrá en comunicación Amsterdam con Bélgica y más lejos aún, con el conjunto de la red ferroviaria europea de alta velocidad. Se describen en este artículo los aspectos más relevantes del concepto de este túnel monotubo de un diámetro excepcional que se ha ejecutado por medio de una tunelera de confinamiento bentonítico. Fundamentalmente, se describen con mayor detalle las principales dificultades funcionales así como también aquellas estructurales que se han tenido en cuenta para llegar a la aplicación de la solución finalmente adoptada.

Le tunnel sud de Saorge

L'incidence de la circulaire prêt à être mis en service

Le tunnel sud des gorges de Saorge, d'une longueur de 647 m, d'une largeur roulable de 8,20 m plus deux trottoirs de 1,00 m, avec une hauteur libre minimale de 4,75 m est appelé à recevoir des véhicules de transport de matières dangereuses. Il a fait l'objet d'un POA approuvé en octobre 1997.

Les travaux de génie civil réalisés entre mars 1999 et décembre 2000, ainsi que les équipements d'éclairage de ventilation et de sécurité, ont dû s'adapter à la refonte de la circulaire en date du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels routiers sur routes nationales.

Le dossier de sécurité, imposé par cette circulaire, qui repose sur une étude spécifique de dangers et sur l'avis d'un expert a été présenté au comité d'évaluation de la sécurité des tunnels en mars 2001. La mise en service a eu lieu en juin 2001.



Figure 1
Plan de situation
Location drawing

■ INTRODUCTION

La route nationale 204, longue de 40 km, axe orienté sud-nord et maillon important de l'itinéraire européen E74, possède la particularité de relier l'Italie (Vintimille, province de Imperia) à l'Italie (Cuneo, province de Cuneo), via le tunnel de Tende, sans être reliée au reste du réseau routier national français.

Elle permet, au fur et à mesure de l'itinéraire, de :

- ◆ découvrir les communes pittoresques de Breil sur Roya, Saorge, Fontan, Tende, la Brigue ;
- ◆ visiter divers monuments baroques ou classés monuments historiques ;
- ◆ accéder au parc national du Mercantour (notamment à la vallée des Merveilles).

Cette route montagneuse, située en fond de valon, est malheureusement sujette à de fréquentes chutes de pierres ou éboulements rocheux, liés à

la structure géologique du massif particulièrement fracturé.

L'Etat a donc décidé de réaliser des aménagements de sécurité, avec le concours financier de la Région Provence Alpes Côte d'Azur, et du département des Alpes-Maritimes.

Ainsi parmi les opérations retenues, les travaux concernant une rectification de tracé dans les gorges de Saorge sont en cours d'achèvement.

■ PRÉSENTATION DE L'OPÉRATION

Le maître d'ouvrage est l'Etat représenté par le directeur départemental de l'Equipement des Alpes-Maritimes. La maîtrise d'œuvre de l'opération étant assurée par le Service des grands projets routiers et des transports, assisté du Centre d'études des tunnels (CETU) et du laboratoire du CETE Méditerranée.

Les travaux d'un montant de 35,37 M€ concernent la construction d'un tracé neuf de 2 400 m de longueur, entre les PR 13+000 et 15+400, sur le territoire de la commune de Saorge. L'origine du projet se situe à environ 3 km au nord de Breil-sur-Roya (figure 1).

L'ensemble du projet a été décomposé en deux phases.

La première concerne la construction de deux ponts franchissant la Roya, et d'un tunnel d'une longueur de 647 m.

La deuxième phase, décomposée en deux tranches fonctionnelles concerne :

- ◆ la tranche amont : construction d'un tunnel de 350 m et des raccordements nécessaires à la mise en service du tunnel ;
- ◆ la tranche aval : élargissement et rectification de virages dans la partie sud.

La première phase, comportant le tunnel sud, a été mise en service en juin 2001. Le tunnel de deuxième phase, tunnel nord, est en cours de réalisation. Les tunnels sont destinés à protéger les usagers de la route des risques de chute de pierres (figure 2).

■ DISPOSITIONS DE GÉNIE CIVIL DU TUNNEL SUD

Les dispositions techniques ont été arrêtées par le P.O.A approuvé en octobre 1997.

D'une longueur de 647 m et orienté nord-sud, ce

2000-63 sur un tunnel

tunnel comporte un tube bidirectionnel présentant une largeur roulable entre trottoirs de 8,20 m, soit deux voies de 3,50 m et deux bandes dérasées de 0,60 m, et deux trottoirs de 1 m.

Le dévers est de 2 % vers l'est. Le profil en long du tunnel présente une pente de 3,2 % sur 392 m.

Le tracé en plan est constitué d'une courbe de 800 m de rayon sur 445 m encadrée d'alignements droits de 132 m à l'aval et de 71 m à l'amont. La hauteur libre de l'ouvrage est de 4,90 m soit une hauteur libre minimale de 4,75 m (figure 3).

■ LA GÉOLOGIE

Le contexte géologique est relativement complexe compte tenu de l'existence de massifs résistants (jurassique) séparés par des formations plus tendres (crétacé, trias).

Lithologie

Sous les colluvions, éboulis et alluvions à caractère meuble, le substratum appartient à la série secondaire de la couverture sédimentaire de l'Argenta Mercantour et est essentiellement constitué de trois horizons bien tranchés :

- ◆ le trias est une formation très hétérogène qui af-



Figure 2
 Plan de phasage
 de l'opération
*Project scheduling
 plan*

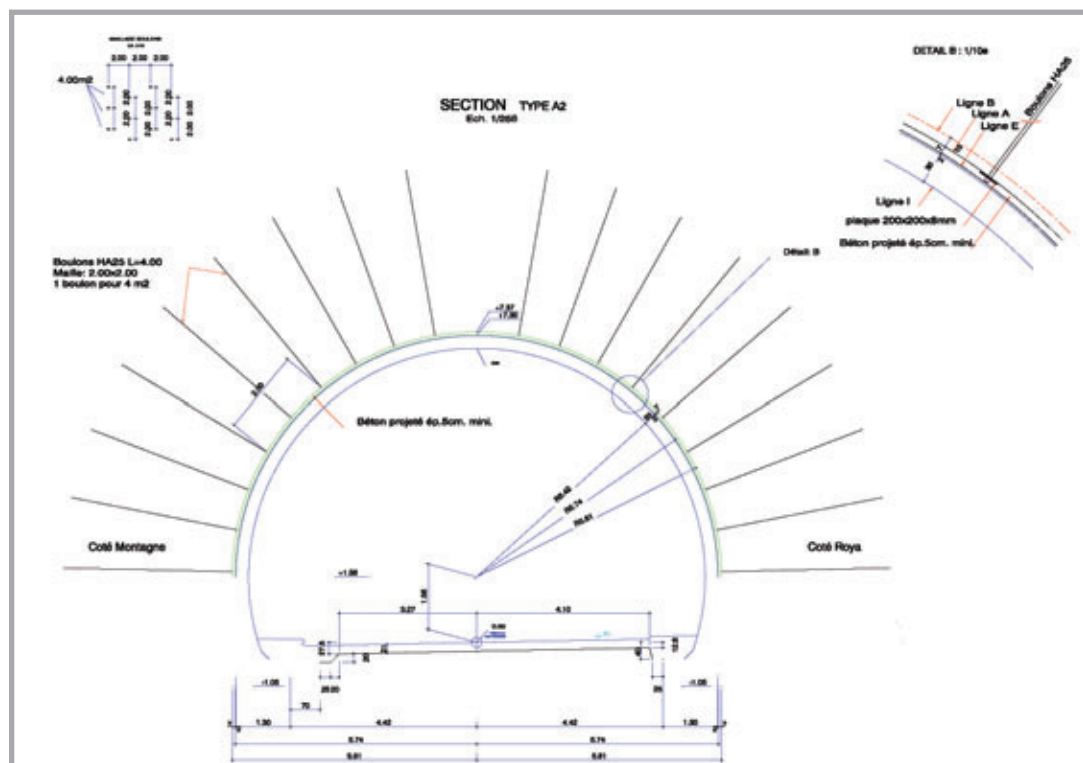


Figure 3
 Coupe type
 du tunnel aval
*Typical cross section
 of the downstream
 tunnel*

La RN 2304
au pied de Saorge
Highway RN 2304
at the base of Saorge



LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Etat - Direction départementale de l'Équipement des Alpes-Maritimes

Maître d'œuvre

Direction départementale de l'Équipement des Alpes-Maritimes - Service des grands projets routiers et des transports

Travaux de génie civil

- Eiffage TP
- EMGC

Protection contre les chutes de pierres

- E.I. Montagne
- Heaven Climber
- Sysiphe

Dispositifs de retenue

Somaro

Chaussées

Colas Méditerranée – SCL TP

Electricité

GTIE Rhône Alpes

Ventilation

Seitha

Réseau d'appel d'urgence

SCLE

Détection incendie

Cerberus

Signalisation verticale inerte

Société RN7

Signalisation verticale dynamique

Société T.T.S.

Coordination SPS

A.I.M.

Dossier de sécurité

Scetauroute

Expertise sécurité

Setec TPI



fleure peu et comprend des argiles (grise, verte, noire), des marnes et dolomies jaunâtres et en dessous un gypse massif où peuvent se développer des cavités karstiques ;

◆ le jurassique se présente comme une forme rocheuse compacte de calcaires et de dolomies gris noir ;

◆ le crétacé est légèrement plus tendre car constitué par une succession de bancs rocheux avec des interlits marneux à stratification bien marquée.

Tectonique

Le site est marqué par la tectonique, dont les structures dominantes sont des accidents verticaux ou subverticaux, et des failles. Le site est classé en zone II selon les dispositions du décret n° 91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique.

Hydrogéologie

Pour chacune des caractéristiques lithologiques on peut constater que le trias est généralement imperméable sauf dans les zones de dissolution de gypse où se développent des réseaux souterrains, le jurassique est siège de circulations d'eau karstique et le crétacé est imperméable sauf dans les zones fracturées.

Instabilités rocheuses

Les instabilités rocheuses se manifestent par la chute sur la chaussée de pierres, blocs ou gros blocs selon la définition du groupe français de normalisation des ouvrages de protection contre les chutes de blocs.

Il faut compléter ce propos en précisant que pendant les travaux de nombreuses chutes de pierres ont été constatées sur la section de route qui allait être abandonnée.

Des protections ont été réalisées au droit des têtes de tunnel, soit par des parades actives (purges, ancrages) ou passives (grillage ou filets pendus, écrans, dispositifs amortisseurs).

Reconnaitances géologiques

Le CETE Méditerranée a réalisé une étude globale de risque et le niveau d'aléas de la zone concernée est très élevé.

Des études de trajectographie ont également été réalisées par le CETE, et des essais géotechniques et géophysiques ont permis de mieux cerner le contexte géologique.

LE PERCEMENT

Le mode de percement retenu a été le travail à l'explosif et non par un tunnelier.

Compte tenu des éléments géologiques, le profil définitif a pu être arrêté. Ainsi une voûte à un seul centre est retenue compte tenu de la fracturation de certains des terrains rencontrés, pour un rayon intérieur de 5,42 m et une hauteur au centre de 1,56 m la section intérieure est de 62 m².

Le percement a été réalisé en attaque descendante à partir de la tête nord, à l'explosif en pleine section mais avec limitation de charge unitaire aux têtes (pont existant, faible couverture rocheuse, falaises) et par volées réduites dans les zones de faible couverture latérale.

Après excavation, les soutènements retenus sont :

◆ coque de béton projeté de 5 cm associée à des ancrages scellés sur toute leur longueur de 4 m ;

◆ coque en béton projeté fibré de 10 cm associée à des ancrages scellés sur toute leur longueur de 4 m mis en place en fonction de la fracturation des roches ;

◆ cintres HEB 180 espacés de 1,60 m calés au terrain soit par béton de blocage soit par béton projeté ;

◆ cintres HEB 180 espacés de 0,80 m calés de la même manière que les autres cintres.

Le revêtement définitif du tunnel est réalisé en béton coffré d'une épaisseur variable de 0,30 m à 0,45 m selon le profil de soutènement.

LES DÉBLAIS

Le marirage a été évacué vers des sites permettant de recevoir les déblais en grand volume soit dans une zone de décharge autorisée par la commune d'accueil soit vers une carrière située en Italie (à 24 km).

■ LES MESURES ENVIRONNEMENTALES

Afin de préserver ce site naturel, les mesures de protection de l'environnement ont été étudiées et réalisées avec soin. Le traitement de l'environnement a été pris en compte dès la conception du projet, et des clauses spécifiques ont été incluses dans les marchés de travaux :

◆ préservation du site :

- protection de l'aire où pousse une orchidée,
- pas d'empiètement des piles des ponts dans le fleuve,
- maintien des accès au fleuve pour la pêche et les activités nautiques ;

◆ intégration dans le site :

- traitement architectural des têtes du tunnel, des parements des murs de soutènement et des locaux techniques (pierres pour parements vus),
- végétalisation des espaces aux deux têtes du tunnel,

- collaboration avec EDF pour la dépose d'une ligne aérienne 20 KVA et réservation dans les tunnels ;

◆ protection lors des travaux :

- traitement des eaux de ruissellement par bac décanteur-déshuileur,
- pas d'entretien des engins sur le site,
- protection de la flore et de la faune,
- pas de rejet de matériaux dans le fleuve,
- pas d'activité de chantier hors emprises définies,
- limitation des nuisances sonores lors des tirs d'explosifs,
- remise en état des zones d'installation de chantier en fin d'activité ;

◆ végétalisation des espaces, réalisée par l'ONF, comportant :

- apport de terre végétale,
- réalisation de fascines,
- plantation de 160 végétaux représentant diverses espèces acclimatées,
- ensemencement hydraulique de 2000 m².

■ ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ DU TUNNEL

La sécurité des usagers a été une préoccupation constante tout au long des différentes phases d'élaboration du projet ou de réalisation des travaux. Une attention particulière a été portée aux différents équipements liés à la circulation des véhicules transportant des matières dangereuses.

Les dispositions arrêtées lors de l'approbation du projet d'ouvrage d'art concernaient :

◆ **les abris ou galeries d'évacuation** : les études de conception du tunnel datant de 1995-1996 ne prenaient pas en compte ce type d'équipement pour un tunnel de cette longueur ;

◆ **les niches de sécurité** : trois ensembles de deux niches de sécurité sont implantés en vis-à-vis de



La Roya au pied du pont amont

La Roya at the base of the upstream bridge

© M. Milton



Le tunnel sud
The southern tunnel

© M. Milton

part et d'autre de la chaussée à une interdistance de 200 m. Ces niches sont fermées au moyen de portes vitrées dont le cadre est peint en orange (même teinte que les postes d'appel d'urgence). L'équipement des niches est constitué d'extincteurs, de prises de courant, d'un poste d'appel d'urgence et d'un éclairage intérieur ;

◆ **la ventilation** : compte tenu des courants d'air frais naturels qui ont été enregistrés dans la vallée et de la longueur du tunnel, le mode de ventilation retenu est la ventilation de désenfumage. Les ventilateurs ne fonctionnent donc pas automatiquement en fonction du degré de pollution, mais uniquement sur commande manuelle lors des interventions en cas de sinistre. La ventilation, longitudinale et réversible, est constituée de trois ensembles de deux accélérateurs de 1 070 N de poussée pour chaque accélérateur, ce qui permet d'assurer une vitesse de l'air de 4 m/s. Chaque couple de ventilateur est implanté au droit de chaque niche de sécurité. L'alimentation électrique est assurée par des câbles circulant dans des fourreaux sous trottoirs puis en câbles apparents en remontée au droit des niches en intrados de la voûte ;

◆ **la désincarcération** : des anneaux résistants à

**Le respect
de l'environnement**
*Environmental
conservation*



© M. Mitton

► un effort de 50 KN sont placés en quinconce tous les 30 m ;

◆ **les équipements électriques** : l'alimentation générale s'effectuera à partir de deux sources EDF : Breil au sud et Fontan au nord via le tunnel aval vers le poste de transformation situé dans le local technique. L'éclairage prévu correspond aux quatre régimes classiques d'éclairage en tunnel ;

◆ **le réseau de lutte contre les incendies** constitué par :

- une citerne de contenance 60 m³ située à chacune des têtes du tunnel. Ces citernes seront alimentées en eau par les pompiers au moyen de camions-citernes,

- en tunnel une colonne sèche Ø 100 mm sous isolateur avec piquage normalisé tous les 50 m dans une niche spécialisée, soit un nombre de niches plus important que la règle,

- à chaque tête, un emplacement de 10 x 4 m réservé au stationnement des véhicules de secours ; à proximité de cet emplacement, deux poteaux incendie normalisés sont raccordés, l'un à la citerne via une canalisation protégée, l'autre à la colonne sèche (distance inférieure à 60 m) ;

◆ **le local technique** : de 7,00 x 3,00 m intérieur il est situé entre le pont aval et la tête aval du tunnel côté est. Il est séparé en deux parties comportant une porte d'accès chacune :

- une salle HT comprenant le poste de livraison et de transformation HT/BT avec :

- 2 cellules interrupteurs sectionneurs avec motorisation télécommandée,
- 1 cellule protection transformateur,
- 1 transformateur sec 20 kV/400 V de 400 KVA,
- 1 tableau de comptage de type "tarif vert EDF" fourni par EDF ;

- une salle BT regroupant les tableaux basse tension et les équipements courants faibles avec :

- un "ensemble onduleur" permettant à partir de deux départs du TGBT de pallier une coupure de courant par fourniture de l'énergie nécessaire à l'alimentation des "circuits ondulés" : éclairage de secours, signalisation, contrôle de l'atmosphère, plots de jalonnements.

L'équipement du local technique comprend, l'éclairage (dont secours), deux prises de courant (dont une secourue), le chauffage-climatisation, une détection incendie-intrusion, une installation téléphonique et un automate programmable qui est en charge de :

- commander les circuits d'éclairage en fonction des états délivrés par les luminancemètres et la cellule photoélectrique de commande,
- générer les alarmes de synthèse,
- stocker les données ventilation (opacimètres, CO, anémomètres), éclairage (enclenchements/déclenchements de circuits), ainsi que d'état et de défaut de tous les dispositifs du tunnel (y compris citerne incendie et bac de rétention).

Le génie civil du tunnel a été terminé à la fin de l'année 2000, les travaux d'installation des équipements ont alors pu débuter.

■ L'INCIDENCE DE LA CIRCULAIRE 2000-63

Suite à la circulaire en date de 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels routiers sur routes nationales, le génie civil et les équipements ont été adaptés pour répondre aux nouvelles normes dans la mesure où les ouvrages concernés le permettaient.

Les modifications concernent :

◆ **la mise en place** :

- d'un système de détection automatique d'incendie dans le tunnel avec renvoi d'alarmes,
- de panneaux d'information pour les usagers de type PMV,
- de barrières de fermeture d'accès au tunnel qui empêcheront d'entrer dans le tunnel en cas d'incident,
- de hublots de balisage de piédroit supplémentaires : soit un plot tous les 10 m au lieu de 20 m,
- de prises de courant électrique supplémentaires dans les niches de sécurité,
- d'alimentations électriques dissociées pour les équipements lumineux de balisage de chaque côté du tunnel,
- de panneaux de signalisation en français et en italien pour indiquer :

- les distances de sortie par rapport à chaque niche de sécurité,
- que les niches de sécurité ne sont pas des refuges protégés du feu ;

◆ **le remplacement** :

- des extincteurs prévus par d'autres de capacité plus importante,
- de certains câblages électriques par des câbles résistants au feu notamment pour les renvois d'alarme des ventilateurs,
- des châssis des ventilateurs pour augmenter la durée de résistance au feu.

Une des nouvelles dispositions imposait aussi la

constitution d'un dossier de sécurité qui était soumis pour avis au comité d'évaluation de la sécurité dans les tunnels routiers.

Ce dossier réalisé de décembre 1999 à février 2001 était parmi les trois premiers à être soumis au comité d'évaluation.

Son élaboration reposait plus particulièrement sur deux nouveautés réglementaires, l'étude spécifique de dangers et l'avis d'un expert.

L'ESD a été élaborée en tenant compte de l'absence d'itinéraire alternatif en raison de l'abandon de l'itinéraire actuel qui est dangereux. L'étude comparative correspondante n'a donc pas pu être réalisée. Un document réalisé par Scetauroute a permis d'identifier des dangers ou événements redoutés et de proposer des scénarios pour traiter l'événement. Cette dernière disposition a servi pour élaborer les consignes de l'exploitant dans le P.I.S. L'avis de l'expert a confirmé les choix du maître d'ouvrage notamment concernant le traitement des quelques non-conformités à la circulaire tout en notant que la non-conformité des cuves incendies devrait être palliée lors des travaux inhérents au tunnel nord.

Ces éléments ont été présentés, dans le dossier de sécurité, au comité d'évaluation de la sécurité des tunnels, le 2 mars 2001 et validés.



© M. Milton

**Le respect
de l'environnement**

**Environmental
conservation**

■ LE COMITÉ D'ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ DES TUNNELS ROUTIERS

Ce comité a rendu le 9 mars 2001, un avis favorable à l'approbation du POA du tunnel nord et à la mise en service du tunnel sud sans restriction particulière de circulation et a formulé les recommandations suivantes :

◆ avant mise en service :

- achever tous les travaux des équipements prévus dans le dossier de sécurité présenté en 2001, et transmettre au préfet un PV de réception des équipements et de leur fonctionnement,
- doubler le nombre des hublots de jalonnement,
- vérifier la résistance au feu des fixations des ventilateurs (450° - 2 h),
- procéder à un exercice pour tester :
 - le système de détection incendie et l'activation automatique du dispositif de fermeture des accès,
 - le contenu du PIS et du PSS et finaliser ces deux documents,
 - l'efficacité du dispositif de recueil et d'évacuation des liquides,
 - l'efficacité de la ventilation dans les deux sens de circulation,
- procéder à une formation des personnels de la DDE qui auront à intervenir sur l'ouvrage ;

◆ après la mise en service :

- construire la citerne aval du tube nord dès que possible pour augmenter le volume d'eau disponible,

- mettre en place les trois PMV dans les meilleurs délais (été 2001),

- étudier la réalisation d'une issue de secours débouchant sur un abri à l'air libre, cette étude sera soumise au comité avant la mise en service du tunnel nord.

Pour l'ensemble formé par les deux tunnels :

◆ assurer la fermeture des tunnels avec des demi-barrières et leur signalisation associée.

La maîtrise d'ouvrage a fait mettre en conformité les équipements avec ces recommandations. Le préfet a alors, par décision, autorisé l'ouverture au public de l'ouvrage pour le 21 juin 2001.

Le tunnel a été officiellement inauguré le 4 juillet 2001 en présence notamment du préfet des Alpes-Maritimes, du président du conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, du président du conseil général des Alpes-Maritimes, des élus locaux (député, sénateur, maires...).

Depuis sa mise en service cet ouvrage n'a pas subi d'incident ou d'avarie. Des exercices de sécurité périodiques ont été réalisés avec le concours des services de gendarmerie et d'incendie et de secours. Ils permettent à l'exploitant de maintenir une veille qualifiée pour sa surveillance.

Depuis sa mise en service aucun accident n'a été recensé.

Le tunnel a été distingué lors de la cérémonie des Rubans d'or 2002, organisée par la Direction des routes, en recevant le Ruban d'or dans la catégorie des aménagements de sécurité.



© M. Milton

Le tunnel sud
The southern tunnel

► LE PROCHAIN COMITÉ D'ÉVALUATION

Au mois de mars 2003, le comité a examiné le dossier de sécurité relatif à la mise en service du tunnel nord.

Le maître d'ouvrage a retenu pour ce tunnel nord l'ensemble des recommandations du précédent comité. En plus, l'étude dans le tunnel sud d'une issue de secours débouchant sur un abri à l'air libre a été réalisée et a été présentée.

L'ensemble de l'opération pourra alors faire l'objet d'une mise en service globale.

ABSTRACT

The southern Saorge tunnel. Consequences of circular 2000-63 for a tunnel ready to be commissioned

D. Charrin

The southern tunnel of the Saorge gorges, 647 m long, of usable width 8.20 m plus two footpaths 1.00 m wide, with a minimum clear height of 4.75 m, will receive vehicles transporting hazardous materials. It was covered by a "POA" civil engineering plan approved in October 1997.

The civil engineering work performed between March 1999 and December 2000, and the lighting, ventilation and safety equipment, had to adapt to the revised circular dated 25 August 2000 relating to safety in road tunnels on national highways.

The safety dossier required by this circular, which is based on a specific hazard study and the recommendation of an expert, was presented to the tunnel safety evaluation committee in March 2001. Commissioning took place in June 2001.

RESUMEN ESPAÑOL

El túnel sur de Saorge. Incidencia de la circular 2000-63 con respecto a un túnel ya en condiciones de servicio

D. Charrin

El túnel sur de la garganta de Saorge, de una longitud de 647 m con una anchura transitable de 8,20 m y con dos aceras de 1,00 m así como una altura libre mínima de 4,75 m está llamado a dar paso a los vehículos de transporte de materias peligrosas. Este túnel ha sido objeto de un POA aprobado en octubre de 1997.

Las obras de ingeniería civil ejecutadas entre marzo de 1999 y diciembre de 2000, así como los equipos de alumbrado, de ventilación y de seguridad, han tenido que adaptarse a la refundición de la circular de fecha 25 de agosto de 2000, relativa a la seguridad de los túneles viarios existentes en las carreteras nacionales.

El dossier de seguridad, impuesto por esta circular, que se funda en un estudio específico de los peligros y en el

parecer de un experto, ha sido presentado al Comité de evaluación de la seguridad de los túneles en marzo de 2001. La entrada en servicio ha tenido lugar en junio de 2001.

Le métro de Toulouse - Lot 2

Le tunnelier Carlos Gardel donne la cadence

Sur le plus important chantier de travaux souterrains en cours en France – la construction de la ligne B du métro de Toulouse –, le groupement Campenon Bernard TP (Sogea Construction) - Eiffage TP aborde le dernier tiers des travaux du lot 2, le plus long (5 km), celui qui comporte le plus de stations et d'ouvrages annexes (14).

Alban Martinotto
DIRECTEUR DU PROJET
Campenon Bernard TP/Sogea Construction

Alain Poloni
RESPONSABLE PRODUCTION
DES STATIONS ET OUVRAGES
ANNEXES
Eiffage TP

Stéphane Campedelli
RESPONSABLE PRODUCTION TUNNEL
Campenon Bernard TP/Sogea Construction

Michel Roudanes
DIRECTEUR DE TRAVAUX EN CHARGE
DES STATIONS
Dodin/Sogea Construction

"**E**n dépit des péripéties qui émaillent nécessairement un projet d'une telle ampleur dans le temps (le délai pour la partie génie civil est de 47 mois) et l'espace (nous avons 14 ouvrages à construire en milieu urbain), toutes les échéances que nous nous étions fixées jusqu'à ce jour ont été respectées, et nous n'avons pas d'inquiétude pour les prochaines, dont la plus rapprochée est la livraison de la station La Vache, en mars 2004", explique Alban Martinotto, de Campenon Bernard TP (Sogea Construction), le directeur du projet, alors que le chantier entame son dernier tiers, à la veille de la Sainte-Barbe 2003. Si l'expérience acquise sur d'autres opérations de grands travaux – métro de Lille, tunnel d'Orelle (Savoie) et surtout première ligne du métro de Toulouse dans les années 1990 – permet à l'évidence au patron du lot 2 d'aborder avec sérénité ce projet, celui-ci n'en demeure pas moins exceptionnel puisque, excepté le tunnel de l'A86 en cours de creusement en Ile-de-France, il est à ce jour dans l'Hexagone le plus important chantier de travaux souterrains.

LE LOT LE PLUS LONG ET LE PLUS COMPLEXE

Avec 15 km de longueur totale, la ligne B du métro de Toulouse mobilise en effet dans le sous-sol de la ville rose pas moins de quatre tunneliers. Des six lots que compte le projet, le lot 2, attribué au groupement Campenon Bernard TP (mandataire) - Eiffage TP, d'un montant de 114 M€, est le plus long (5 km), celui qui comporte le plus de stations (7) et d'ouvrages annexes (sept puits de ventilation et ouvrages d'épuisement).

Au terme d'une période de préparation de seulement deux mois, "extrêmement courte puisqu'il a fallu, dans ce laps de temps, sélectionner les sous-traitants et lancer les plans d'exécution", explique Alain Poloni, d'Eiffage TP, responsable production des stations et ouvrages annexes, les travaux ont commencé en août 2001 avec l'exécution des



Plan du tracé du métro toulousain
Layout plan of the Toulouse metro

GRANDES LIGNES DE LA LIGNE B

Croisant la ligne A, d'orientation nord-est - sud-ouest, au niveau de la station Jean-Jaurès, la ligne B, d'axe nord-sud, épouse approximativement le tracé de la Garonne et reliera des zones denses d'habitat à d'importantes zones d'activité. Mise en chantier à la fin du printemps 2001 pour les stations et à l'été 2002 pour le creusement des galeries, la nouvelle ligne s'étend sur 15 km et comprendra 20 stations. A sa mise en service en 2007, elle marquera l'aboutissement d'un projet d'organisation des transports esquissé pour l'essentiel dès 1980 par le Syndicat mixte des transports en commun de l'agglomération toulousaine (Tisseo-SMTC), maître d'ouvrage du projet, et ses rames automatiques transporteront quotidiennement quelque 300 000 passagers.



Afin d'accueillir sans dommage le tunnelier qui débouche en station avec une très grande précision, le mur tympan reçoit divers équipements de renfort : voûte parapluie, cloutage en fibre de verre, béton projeté et fibré sur 20 cm d'épaisseur

In order to receive without any harm the tunnel boring machine coming into the station with very great precision, the frontwall receives miscellaneous reinforcements : umbrella arch, glass fibre chipping, and fibre-reinforced shotcrete to a thickness of 20 cm

La cabine de pilotage du tunnelier, avec sa batterie d'écrans de contrôle et son pupitre de commande. Non visible sur la photo, un écran est dédié au système d'acquisition Cap, qui enregistre en temps réel toutes les données du creusement et assure une totale "traçabilité" du chantier

The TBM control cab, with its array of monitor screens and its control console. A screen, not visible on the photo, is dedicated to the Cap acquisition system, which records in real time all the tunnel driving data and ensures complete "traceability" of the project



Avant d'être définitivement fixés et scellés par injection de mortier, les voussoirs sont boulonnés au fur et à mesure de leur mise en place par l'érecteur de voussoirs, à l'arrière de la tête de tunnelier

Before being finally attached and cement grouted, the segments are bolted as they are put in place by the segment erector, to the rear of the TBM head



LE TUNNELIER

Bouclier à pression de terre

- Diamètre : 7 740 mm
- Jupe : type articulé (diamètre : 7 730 mm)
- Joint de queue à brosses et écailles
- Roue de coupe : type mixte (diamètre 7 770 mm)
- Puissance installée : 2 000 kW
- Poids du bouclier : 500 t
- Capacité de la vis de marinage : 350 m³/h
- Capacité du convoyeur à bande : 600 t/h (et jusqu'à 800 t)
- Longueur du tunnelier complet : 70 m
- Poids : 700 t



parois moulées de quatre stations et prioritairement de Trois Cocus, celle située le plus au nord et point de départ du tunnelier. En parallèle, commande était passée chez Herrenknecht d'un tunnelier à pression de terre d'un diamètre de 7,77 m.

DE MULTIPLES CONTRAINTES D'EXÉCUTION

Choisie par le maître d'œuvre pour minimiser l'incidence des travaux sur la circulation, la technique des parois moulées s'est révélée très contraignante d'exécution pour les stations les plus rapprochées du centre-ville. Pour construire ces ouvrages situés sous de grands axes ou des carrefours, il fallait en effet réaliser une paroi après l'autre en rétablissant à chaque fois les voiries. De même, les dalles

de couverture ont dû être réalisées par moitié. Et pour réduire les emprises de chantier au minimum, quatre stations (Barrière de Paris, Minimes et Jeanne d'Arc) ont été réalisées en taube, les travaux s'effectuant sous la dalle de couverture, d'abord de haut en bas (terrassements et radier) puis de bas en haut (construction des dalles intermédiaires). Toutes basées sur un schéma identique (50 m de longueur, 15 m de large, 15 m de profondeur) avec quatre niveaux (couverture, salle des billets, "mezzanine" et quais), les stations sont en réalité toutes différentes, chacune ayant son propre architecte, supervisé par le maître d'œuvre. Construite à l'emplacement d'un ancien terrain vague où la place ne manque pas, la station La Vache multiplie ainsi les accès, tandis que, resserrée sous le boulevard du même nom, Minimes les restreint au minimum. "Mais les différences portent aussi sur le nombre et l'emplacement des trémies destinées aux escaliers, aux Escalators et aux ascenseurs, ainsi qu'à des détails de nature plus architecturale comme les caissons de plafond", précise Michel Roudanes, de Dodin, directeur de travaux en charge des stations.

PRIORITÉ AU TUNNELIER

"De toutes les contraintes liées à la conception et aux conditions d'exécution des stations, la plus forte est celle de la dalle 'mezzanine', poursuit Michel Roudanes, puisqu'elle se situe à un niveau inférieur au point haut de la voûte du tunnel et qu'elle ne peut donc être construite qu'après le passage du tunnelier."

Ainsi, pour pouvoir respecter les délais tout en privilégiant le creusement de la galerie – le volet de travaux le plus exposé aux aléas – il a parfois fallu construire le niveau salle des billets avant la dalle mezzanine, à l'inverse de la logique "de bas en haut", avec ce que cela implique de complexité supplémentaire (aménagement de trémies provisoires pour les approvisionnements, installation de portiques et de systèmes de palans pour la manutention des butons, étaieage des éléments de coffrages, etc.).

"Sur un autre plan, il nous a aussi fallu apporter des solutions à des difficultés liées à la conception et au dimensionnement des ouvrages car le nombre important des trémies impliquait notamment de reprendre les efforts au niveau des dalles, explique Alain Poloni. Nous avons ainsi augmenté l'épaisseur des murs, les ferrallages, qui atteignent parfois des valeurs très élevées (jusqu'à 250 kg/m³), employé des bétons à hautes performances (B40), etc."

En parallèle, les équipes des stations et leur encadrement – de 180 à 200 hommes – étaient renforcés et le travail passait à deux postes (sept heures par jour, cinq jours par semaine).

■ DANS LES STARTING-BLOCKS DU FAUX TUNNEL

A la station Canal du Midi (cf. encadré " Station Canal du Midi), au milieu de la forêt d'étais de la passe charretière prête à recevoir les coffrages de la dalle mezzanine, le tunnelier Carlos Gardel a entamé sa progression en direction de Compans-Cafarelli, mais depuis peu, ce qu'indique la présence à l'intérieur de la station du "faux tunnel", tronçon de galerie d'une dizaine de mètres appuyée sur un massif bâti de poutres d'acier lui-même bloqué au niveau de la paroi moulée par l'intermédiaire de butons.

"Cette structure, qui sera démolie dès que le tunnelier aura suffisamment progressé, est indispensable lors du démarrage du percement après le franchissement des stations, explique Stéphane Campedelli, de Campenon Bernard TP (Sogea Construction), responsable production tunnel, puisque ce sont les anneaux de la galerie qui servent de point d'appui aux vérins de poussée, et que ceux-ci sont situés en arrière de la tête de coupe."

Le foisonnement des gaines et des conduites, l'exiguïté des passages, les niveaux de coursives donnant accès aux différentes parties de la machine, l'ambiance sonore, tout ici évoque une salle des machines de navire, et l'ambiance de la cabine de



L'entrée du tunnel à Trois Cocus, la station de départ. A gauche, l'arrivée du convoyeur à bande, par où transitent les déblais; en haut, la gaine et la cheminée de ventilation; au sol, les rails métalliques qui assurent le guidage du train de tunnel à l'extérieur de la galerie

The tunnel entrance at Trois Cocus, the starting station. On the left, the arrival of the belt conveyor, over which pass the earth cuts; at the top, the ventilation duct and shaft; on the ground, the steel rails which guide the tunnel train outside the gallery



Section de galerie terminée. Grâce à l'utilisation d'un élément radier en béton préfabriqué, un train sur pneus d'un modèle inédit peut être utilisé sur le lot 2, circulant à une vitesse supérieure aux trains de mine classiques. Il permet non seulement de s'affranchir des poutres, traverses et rails traditionnels, mais délimite pour les piétons une voie de circulation dégagée et sûre

Completed gallery section. Thanks to the use of a prefabricated concrete foundation raft element, a pneumatic-tyred train of a novel type can be used on work section 2, travelling at a higher speed than conventional mine trains. It not only makes it possible to do without the traditional girders, sleepers and rails, but it also demarcates a clear, safe traffic lane for pedestrians

commande rappelle aussi celle d'une passerelle. Le pilote ne quitte pas des yeux une batterie d'écrans où s'affichent les paramètres de marche. L'un d'entre eux, figurant une mire, le guide pour diriger la machine en jouant sur la pression des 15 paires de vérins d'appui; il lui faut aussi contrôler le roulis, car la puissance énorme développée au niveau de la roue de coupe tend à entraîner le tunnelier en sens inverse. Une caméra vidéo braquée sur la sortie de la vis de marinage permet de surveiller le volume et la consistance des déblais rejetés sur le convoyeur à bande. "Le sous-sol est essentiellement constitué de molasses, c'est-à-dire d'argiles franches et dures, mais on y trouve aussi des poches de sables aquifères qui nous obligent à injecter des additifs pour éviter que les matériaux, en se mélangeant, ne deviennent collants, ce qui rendrait leur extraction difficile. Après une période de rodage des équipes, nous avons atteint des cadences exceptionnelles – jusqu'à 40 m/j – souligne Stéphane Campedelli, quand on dit 40 m creusés, c'est 40 m de tunnel quasiment fini, puisque la pose des voussoirs s'effectue au fur et à mesure de l'avancement."

■ 15 À 20 MINUTES PAR ANNEAU

Dès que le creusement a atteint 1,40 m, le tunnelier suspend en effet sa progression le temps que soit mis en place un nouvel anneau, large de 1,40 m, sur lequel les vérins reprendront appui. Depuis l'aire de déchargement, au niveau de la première remorque du tunnelier, les voussoirs, pesant chacun 4 t (0,9 t pour la clé), sont acheminés par un chariot jusqu'à l'érecteur de voussoirs, puis, par une machine hydropneumatique qui les installe en 15 à 20 minutes en les maintenant par vide

CANAL DU MIDI, UNE STATION 100 % ÉTANCHE

Face à l'hôtel de police, la station Canal du Midi présente la même complexité de conception que les autres avec des particularités liées à son implantation sous le lit du canal. Suivie de près par la presse locale, sa construction en deux phases a conduit à dévier la voie navigable sur 200 m en battant un rideau de palplanches pendant la période de chômage hivernal du canal. "C'est la station la plus complexe, explique Alain Poloni, parce qu'elle doit être totalement étanche."

A l'intérieur des parois moulées, sa structure en voiles de béton sera donc entièrement enveloppée dans un géotextile et une membrane PVC raccordés par un système de saignées sur les voussoirs des tunnels, eux-mêmes totalement étanches. Deux solutions ont en outre été prévues pour contrebalancer la poussée d'Archimède exercée au niveau de cette cellule étanche : un radier poids de 3 m d'épaisseur (au lieu du radier drainant de 30 cm des autres stations) et un système de poutres "corbeaux" ancrées dans la partie supérieure de la paroi moulée et des murs tympans, bloquant toute remontée.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Tunnel

- Longueur forée : 4 731 m
- Diamètre d'excavation : 7,77 m
- Diamètre revêtement : 6,80 m (intérieur)
- Nombre de voussoirs par anneau : 5 + 1 clé + 1 élément de radier
- Longueur des anneaux : 1,40 m et 1 m
- Nombre total de voussoirs : 26 000 (40 300 m³)
- Volume des déblais : 225 000 m³ (517 000 t)
- Béton : 27 000 m³

Stations

- Nombre : 7
- Surface parois moulées : 24 142 m²
- Surface parois coulis : 10 201 m²
- Béton structure (hors parois moulées) : 40 000 m³
- Armatures : 3 800 t
- Terrassements : 162 000 m³

Ouvrages de ventilation et d'épuisement

- Nombre : 7
- Béton de structure : 2 150 m³
- Armatures : 188 t
- Terrassements : 6 300 m³



Station Canal du Midi. Au premier plan, la remorque du tunnelier. A droite, le bâti du faux tunnel qui sert de point d'appui à la machine sur les premiers mètres de creusement

Canal du Midi station. In the foreground, the TBM trailer. On the right, the portal frame which serves as a supporting point for the machine over the first metres of tunnel driving

d'air. Elle est radiocommandée par un opérateur, qui solidarise ensuite chaque élément du nouvel anneau au précédent à l'aide d'impressionnants boulons de 40 cm de long, tandis qu'un mortier injecté sous pression entre voussoir et terrain parachève l'étanchéité et prévient tout mouvement de terrain autour du tunnel. "Le système utilisé ici est l'anneau universel, explique encore Stéphane Campedelli, qui repose sur une largeur d'anneau qui n'est pas constante et permet, en jouant sur la position des éléments, de construire des galeries droites ou courbes en garantissant un assemblage et une étanchéité parfaits, car chaque voussoir, il faut le savoir, est une pièce de haute précision dont les tolérances de fabrication n'excèdent pas le millimètre."

Station Canal du Midi. Implantée sous le lit du canal, cette station doit être totalement étanche, ce qui a conduit à utiliser des tirants de renfort en plus des butons et à mettre en place une membrane de PVC qui enveloppera la station en totalité

Canal du Midi station. Located under the bed of the canal, this station must be completely watertight, which led to the use of reinforcing tension members in addition to the stays, and the laying of a PVC membrane to cover the entire station



LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Tisseo-SMTC (Syndicat mixte des transports en commun de l'agglomération toulousaine), comprenant la Ville de Toulouse, le syndicat intercommunal et le département

Maitre d'ouvrage délégué

Société du métro de l'agglomération toulousaine (Smat)

Maitre d'œuvre

Groupement Systra -TTE - Ingerop - Seti

Groupement d'entreprises

Campenon Bernard TP (Sogea Construction), mandataire; Eiffage TP

Sous-traitants

- Botte Sade Fondations - Sefi - Press-pali (parois moulées)
- Axel (murettes)
- La Pyrénéenne (terrassements, remblais)
- Quintans (armatures)
- EIGCC (étanchéité)
- Dodin-SAES (préfabrication des voussoirs)
- Seso (génie civil des puits de ventilation)
- Sat TP (mise en décharge des déchets de marinage)
- Cofex
- Soltechnic (traitement des tympans)

ABSTRACT

The Toulouse metro - Work section 2. The Carlos Gardel TBM sets the pace

A. Martinotto, A. Poloni, St. Campedelli, M. Roudanes

On the largest underground project underway in France, construction of line B of the Toulouse metro, the consortium formed by Campenon Bernard TP (Sogea Construction) and Eiffage is approaching the last third of the section 2 work, which is the longest section (5 km), and that with the most stations and accessory structures (14).

RESUMEN ESPAÑOL

El metro de Toulouse - Lote 2. La tunelera Carlos Gardel impone su ritmo

A. Martinotto, A. Poloni, St. Campedelli y M. Roudanes

En las obras subterráneas más importantes que se encuentran actualmente en curso de ejecución en Francia, figura la construcción de la línea B del metro de Toulouse, en cuyo caso la agrupación de empresas Campenon Bernard TP (Sogea Construction) - Eiffage da comienzo a la tercera parte de las obras del lote 2, que es aquel de mayor longitud (5 km) y que contiene el mayor número de estaciones y estructuras anexas (14).

Galerie technique pour la ZAC de l'Aéroconstellation de l'agglomération toulousaine

Dans le cadre de la construction de la zone d'aménagement concerté (ZAC) de l'Aéroconstellation, Setomip en charge des travaux d'équipement d'intérêt général (EIG) a réalisé une galerie technique de 2500 m de longueur. Cette galerie permettra à terme le passage de nombreux réseaux (eau surchauffée, air comprimé, haute tension 20 kV et autres fibres optiques) entre les différents bâtiments de la ZAC. La galerie a été réalisée dans des sols argilo-graveleux et partiellement dans le substratum mollassique.

La nappe phréatique très présente sur le site doit s'écouler librement autour des galeries sans un effet de barrage. Le géocomposite Alvéodrain va donc jouer un rôle important pour satisfaire cette condition.

■ CONTEXTE GÉNÉRAL

La ZAC Aéroconstellation a été créée par la communauté d'agglomérations du Grand Toulouse pour recevoir les structures d'accueil nécessaires au développement des activités aéronautiques dans le secteur nord-ouest de la ville de Blagnac, plus particulièrement aux bâtiments et aux services liés au montage du gros porteur Airbus A380 et au centre d'entretien des petits porteurs d'Air France Industrie dont le lancement a été décidé en décembre 2000. Ce projet sur un territoire situé au contact direct de l'aéroport de Toulouse-Blagnac couvre 270 ha environ, avec une extension ultérieure à 360 ha. Parmi l'ensemble des travaux réalisés par l'aménageur Setomip, maître d'ouvrage délégué par la communauté d'agglomérations du Grand Toulouse, un marché a été lancé pour réaliser le génie civil des galeries, siphons, fosses et dalots. Une grande partie de la gestion des eaux pluviales a été résolue par la création de *waterways* pour stocker la pluie centennale dans un site largement imperméabilisé par la réalisation des taxiways et des bâtiments. Or ces *waterways* communiquent entre eux au même niveau que la galerie technique, nécessitant la création de siphons et de drainages spécifiques.

De plus, la méthode d'excavation a été laissée libre de choix aux entreprises lors de la consultation. La coupe de principe du marché de la galerie est illustrée sur la figure 1.

■ MÉTHODE DE RÉALISATION DU GROUPEMENT D'ENTREPRISES

Le groupement d'entreprises (Dodin, Sogea Sud-Ouest et DV Construction) a proposé de réaliser la galerie avec un blindage par poteaux et panneaux

couissants qui, lui-même servit de coffrage extérieur. Cette solution choisie pour sa cadence supérieure à une solution palplanches, a été complétée par un système de drainage multiple (photo 1). En effet, pour éviter un effet barrage de la nappe phréatique, plusieurs dispositifs ont été prévus :

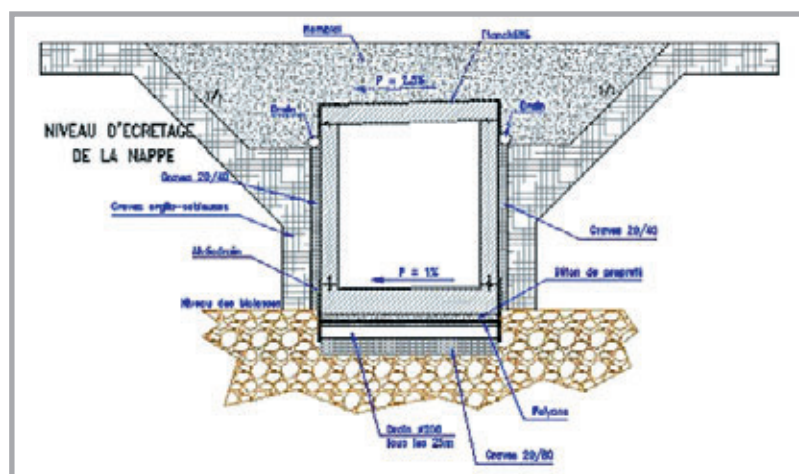


Figure 1
Coupe de principe du marché
Schematic cross section of the project



Photo 1
Vue globale du chantier
Overall view of the site

Jean-Philippe Aumoine
DIRECTEUR D'AGENCE
Setomip

Richard Angosto
CHEF DE PROJET
Setomip

Edward Clayton
RESPONSABLE SITE MOE
Setec TPI

Thierry Louge
RESPONSABLE CHANTIER MOE
Setec TPI

Bruno Chavanne
CONDUCTEUR TRAVAUX MOE
Setec TPI

Jean-Paul Brisard
DIRECTEUR TRAVAUX
Dodin

Rabah Arab
DIRECTEUR TECHNIQUE
Afitex

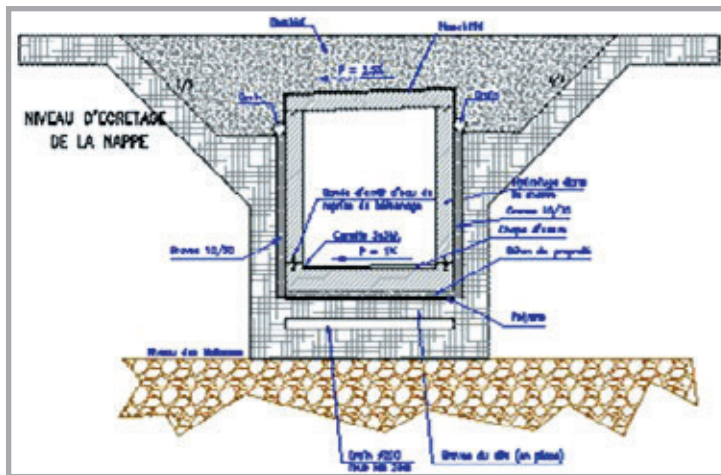


Figure 2
Coupe
dans les molasses
basses
*Cross section
of the lower molasses*

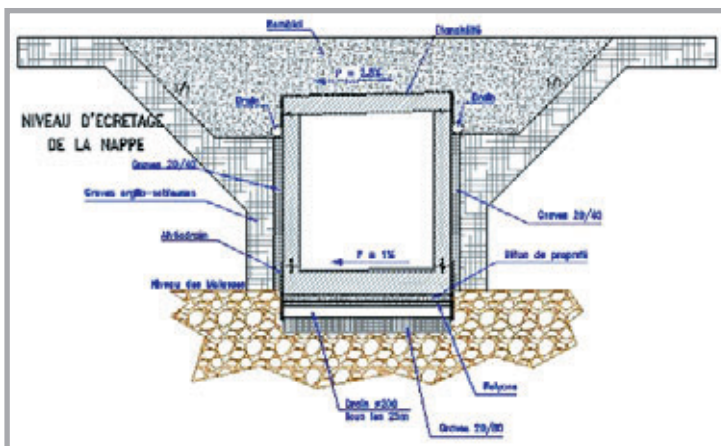


Figure 3
Coupe
dans les molasses
hautes
*Cross section
of the upper molasses*



Photo 3
Galerie en construction - Vue sur l'Alvéodrain F
et les armatures

*Duct undergoing construction - View of Alvéodrain F
and reinforcements*



Photo 2
Molasses indurées
Indurated molasses



- ◆ de part et d'autre de la galerie, un masque drainant en grave 20/40;
- ◆ sous la galerie, vérification d'une épaisseur suffisante de grave sableuse (figure 2) ou substitution de la molasse étanche par une grave 20/40 (figure 3);
- ◆ tous les 25 m, mise en place de drains transversaux;
- ◆ cinq ouvrages de rétablissements de nappes dans les zones préférentielles de la nappe;
- ◆ drains d'écrtage de nappe en partie supérieure de la galerie.

La galerie est un ouvrage relativement étanche avec points bas tous les 80 m environ et évacuation vers les waterways. Ainsi, la galerie en partie profonde dans les zones hautes du toit de la molasse s'est retrouvée enchâssée dans une zone étanche (figures 2 et 3).

■ DESCRIPTION DE LA SOLUTION RETENUE

La principale difficulté a été de concevoir une solution souple et efficace qui permet :

- ◆ de résoudre l'impossibilité de creuser et de faire descendre les panneaux de blindage dans la molasse indurée sur les 70 premiers centimètres. Dans ce cas, le masque drainant fut donc impossible à réaliser (photo 2);
- ◆ de faire passer une grande quantité d'eau de la nappe par un espace réduit;

- ◆ de trouver un produit souple pour s'adapter au blindage et un produit qui ne s'arrache pas au moment du retrait du blindage.

Ainsi, la solution retenue consiste, en :

- ◆ l'arrêt du blindage sur l'arase supérieure de la molasse;
- ◆ la poursuite du creusement pour la mise en place du matelas en grave et des drains sous la galerie;
- ◆ la mise en place de l'Alvéodrain F qui est également réparti entre la grave argilo-sableuse et la molasse (effet de pontage);
- ◆ le calage de l'Alvéodrain par la grave 20/40;
- ◆ la mise en place d'un polyane pour couler le béton de propreté sur le gravier (photo 3);
- ◆ et enfin, ferrailage-bétonnage du radier contre l'Alvéodrain F.

■ DESCRIPTION DES TRAVAUX

Lors du terrassement, l'entreprise a eu peu de difficulté à creuser dans la grave argileuse de surface, ainsi que dans la grave argilo-sableuse.

La phase de terrassement dans la molasse a été limitée à l'espacement entre panneaux.

Un relevé systématique (point d'arrêt) a été réalisé entre le terrassier et la maîtrise d'œuvre. La pose de l'Alvéodrain F a été décidée à l'ouverture de la fouille suivant la configuration du terrain et la profondeur de la galerie.

Le béton du radier est réalisé directement contre l'Alvéodrain F qui se plaque contre le blindage. La forme alvéolée incrustée de béton empêche l'arrachage du produit lors du retrait du blindage tout en laissant l'espace de vide du produit (photo 4). Puis, le groupement a mis en place les armatures

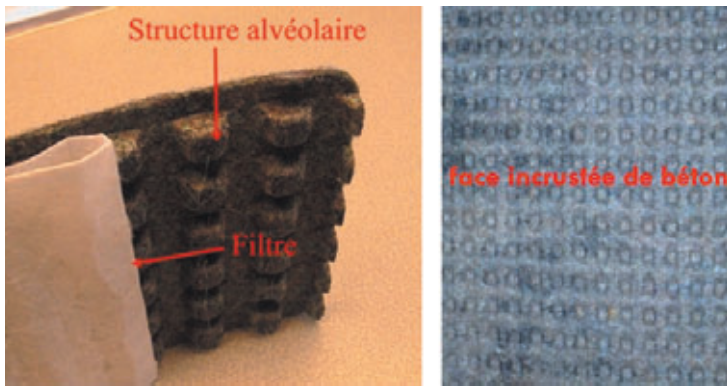


Photo 4
Structure
du géocomposite
Alvéodrain F
Structure
of the Alvéodrain F
geocomposite

de la voûte et le coffrage tunnel. Le blindage est protégé du béton en partie supérieure par une feuille plastique alvéolée classique.

Le retrait du blindage a permis la mise en place immédiate de grave dans l'espace vide laissé par ces panneaux.

Le calcul remis par le bureau d'études Géoroute Ingénierie confirme le bien-fondé de la solution retenue dans la capacité du produit à faire transiter la nappe en plus des dispositions citées ci-dessus. Un indice permet de vérifier la capacité drainante du procédé : quelques fuites importantes de la nappe ruisselant sur les panneaux de blindage puis dans l'Alvéodrain F, sont passées sans difficulté sous le radier.

CONCLUSION

Cette solution souple a permis au groupement de ne pas descendre en vain les panneaux de blindage dans la molasse. L'adaptation du projet validé par le calcul et accepté par la maîtrise d'œuvre, a permis de conserver l'attrait de cette solution de creusement-blindage-coffrage dans un contexte de planning tendu lié aux créations de sites industriels. Cette technique a, jusqu'à présent et en cette période de fin de travaux, donné entière satisfaction.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Communauté d'agglomérations du Grand Toulouse

Maître d'ouvrage délégué

Société d'Équipement de Toulouse Midi Pyrénées

Maître d'œuvre

Setec TPI

Coordination Santé Sécurité

S.C.O.

Entreprises

- Génie civil : Dodin - Sogea Sud-Ouest - DV construction
- Terrassement blindages : Cassin TP
- Armatures : S.A.S.

Bureau d'études

Seti

ABSTRACT

Main services duct for the Aéroconstellation "ZAC" (mixed development zone) in the Toulouse urban area

Various authors

Within the framework of construction of the "ZAC" mixed development zone of Aéroconstellation, Setomip, in charge of general-interest equipment work, constructed a main services duct 2,500 metres long. This duct will eventually enable numerous networks to be laid (superheated water, compressed air, 20 kV high-voltage cable, optical fibre, etc.) between the various buildings in the "ZAC". The duct was constructed in clayey-gravelly soils and partially in the mollassic substratum.

The aquifer, very strongly present on the site, must be able to flow freely around the ducts without any barrier effect. The geocomposite Alvéodrain will therefore play a major role in meeting this condition.

RESUMEN ESPAÑOL

Galería técnica para la ZAC de la Aeroconstelación de la aglomeración urbana de Toulouse

Autores diversos

Actuando en el contexto de la construcción de la Zona de planificación concertada (ZAC) de la Aeroconstelación, Setomip tiene a su cargo las obras de equipamiento de interés general (EIGG) y ejecuta una galería técnica de 2500 m de longitud. Esta galería permitirá, en su día, el paso de numerosas redes técnicas (agua recalentada, aire comprimido, tendido de electricidad de alta tensión 20 kV y demás fibras ópticas) entre los diversos edificios de la ZAC. La galería ha sido realizada en suelos arcilla-grava y, parcialmente, en el substrato molásico.

La capa freática, sumamente presente en el emplazamiento debe circular libremente en torno de las galerías sin causar ningún efecto de retención. El material geocompuesto Alveodrain va a desempeñar, en este caso, un importante cometido para cumplir esta condición.

Evolution des techniques réel sur les chantiers de urbains

L'évolution rapide des techniques d'instrumentation en temps réel de sols et de structures permet de mettre en place des boucles rapides de rétroactions pendant le creusement de nouveaux tunnels urbains. Ces rétroactions intègrent le monitoring, elles passent éventuellement par une validation rétrospective des hypothèses de calcul, des calculs complémentaires, la modification de la méthodologie de réalisation du tunnel, des travaux de confortements préventifs, des injections de compensations.

Cet article présente différentes étapes technologiques franchies depuis dix ans à l'occasion des grands chantiers de percement de tunnels urbains (Amsterdam, Londres, Puerto Rico, Madrid, Hong Kong, Toulon).

■ ÉTAPE N°1

Acquisition et traitement d'informations en temps réel

En 1993 les chantiers de percement de la Jubilee Line à Londres ont introduit des problématiques nouvelles qui sont à l'origine du monitoring temps réel de tunnels urbains. Ces chantiers comportaient en effet des travaux importants d'injections de compensation permettant de maintenir en service les viaducs victoriens supportant une circulation ferroviaire intense qu'il s'agissait de ne pas perturber. Les injections de compensation réalisées nécessitaient un flot important d'informations en temps réel permettant aux "injecteurs" de connaître

en temps réel la déformation des ouvrages et des bâtiments, la localisation des tassements, l'effet de l'injection de compensation. L'étendue des sites de compensation et le nombre de capteurs utilisés ont joué également un rôle important dans la réflexion sur le dimensionnement des logiciels et outils d'acquisition temps réel à mettre en œuvre (figures 1 et 2).

Les ingénieurs de SolData sont intervenus sur les lots 101, 103, 104, 105, 107, 108, 110 et ont développé des outils logiciels d'instrumentation temps réel (Géoscope) permettant l'acquisition d'un grand nombre de capteurs (près de 3 000 capteurs en temps réel) et des méthodes d'acquisition d'informations numériques permettant de résister aux conditions de chantier et de sécuriser la transmission des mesures. Ces outils ont permis de franchir une première étape technologique dont les mots clés sont :

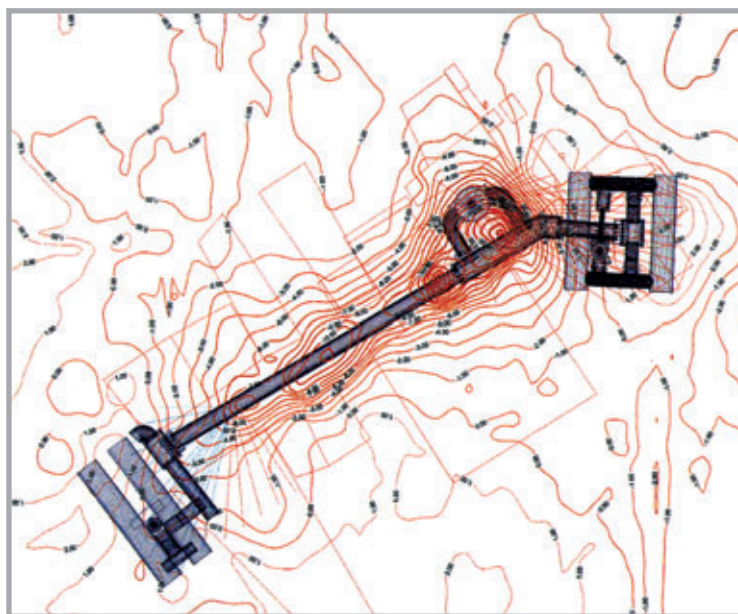
- ◆ instrumentation temps réel;
- ◆ dispositifs d'acquisition adaptés aux conditions de chantiers (électronique, transmission);
- ◆ acquisition de grandes quantités d'informations (10 millions de mesures par chantier environ);
- ◆ outils de traitement et de synthèse d'information en temps réel.

■ ÉTAPE N°2

Utilisation de Cyclops

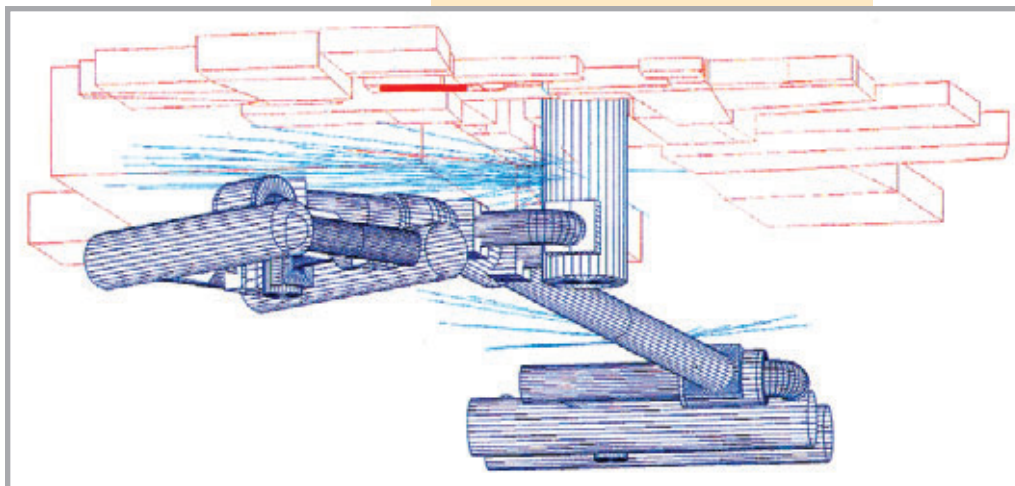
A partir de 1995 SolData, en partenariat avec l'Institut géographique national, a développé un puissant outil de topographie robotisé appelé Cyclops. Le module Cyclops comprend un théodolite motorisé piloté par ordinateur. L'instrument vise successivement des prismes cibles passifs fixés sur le bâtiment ou la structure à observer. Des algorithmes permettent de rechercher et de détecter le centre des différentes cibles visées. Cyclops vise également des cibles de référence et applique sur ces mesures brutes les corrections nécessaires pour tenir compte des mouvements éventuels du théodolite et des effets atmosphériques. Les informations recueillies sont traitées en temps réel et visualisées par le logiciel d'instrumentation Géoscope.

Cyclops, utilisé par ailleurs sur de nombreux chantiers de surveillance de structures, a été installé pour la première fois en 1998 sur un chantier de percement de tunnel urbain à Puerto Rico aux Etats-Unis (photo 1 et figure 3).



Figures 1 et 2
Jubilee line extension
lot 101 : injections
de compensation outils
de visualisations 2D/3D
de Géoscope

Jubilee Line extension
work section 101 :
compensation grouting,
Géoscope 2D/3D display
facilities



de monitoring temps percement de tunnels

Le métro de Puerto Rico comportait la réalisation de la station Rio Piedras à une faible profondeur sous le centre de la ville. La mise en œuvre d'injections de compensation sous les bâtis a été décidée pour éviter les désordres liés à la réalisation de la station. Néanmoins ces travaux étaient compliqués par la difficulté d'installer des capteurs sur le site, à cause de la configuration et de la densité des immeubles, et de faire passer des géomètres en dehors de la rue principale. Les informations disponibles avec les technologies existantes étaient nettement insuffisantes pour piloter des injections de compensation. Cette difficulté a conduit SolData à installer deux Cyclops et 150 cibles de mesure fixées sur les bâtiments de la zone sensible. Les Cyclops ont ainsi permis de répondre aux différentes problématiques du chantier :

- ◆ fréquence de mesures élevée adaptée au délai de réponse sol-structure (environ 3 heures);
 - ◆ densité de mesures adaptée à l'étendue du site;
 - ◆ bonne répartition des mesures sur le chantier.
- Des prismes de référence situés à l'extérieur de la zone d'influence des tassements permettaient aux Cyclops situés au centre des zones d'injection de corriger en temps réel leurs mesures brutes et de fournir en temps réel des mesures absolues sur les tassements et l'inclinaison du mur des bâtiments.

La qualité et la rapidité des mesures fournies ont contribué au succès des travaux de compensation et ont établi la supériorité des Cyclops pour ce type de chantiers. Ainsi dès 1999, les responsables des travaux d'injection de compensation à Madrid pour le percement de la Linéa 1 ont opté également pour la mise en œuvre de Cyclops.

■ ÉTAPE N°3

Communications radio

La mise en œuvre de systèmes d'instrumentation en temps réel a posé dès 1993 des problèmes de transmissions d'information pour quatre raisons principales :

- ◆ la sécurisation des données;
- ◆ le contexte des chantiers de travaux (boue, caractère évolutif, circulation d'engins...);
- ◆ les contraintes urbaines (chaussées, autorisations, propriétés privées, concessionnaires...);
- ◆ la longueur importante de certains sites.

La sécurisation des données a rapidement orienté

les systèmes d'acquisition sur des transmissions d'informations numérisées qui permettent de mettre en place des protocoles d'échanges d'informations, des cryptages et de s'affranchir du parasitage des mesures analogiques.

Des conditionnements et des matériels adaptés aux conditions de chantier ont permis d'installer des systèmes d'acquisition au plus près des instruments géotechniques et de transmettre les mesures numérisées dans de bonnes conditions en limitant en particulier les câblages à un seul bus numérique de terrain reliant les centrales d'acquisition.

L'affranchissement des contraintes urbaines et des problèmes de distance a été résolu à l'occasion du site du tunnel de Toulon. Après les difficultés rencontrées en 1996, les travaux de percement du tunnel autoroutier de Toulon ont repris sous la sur-



Photo 1
Cyclops sur le chantier de Puerto Rico
Cyclops on the Puerto Rico site

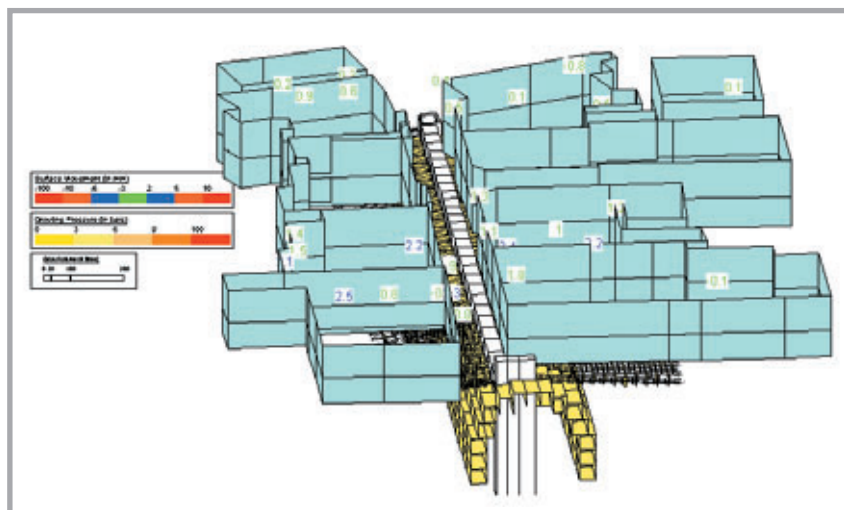


Figure 3
Station Rio Piedras Puerto Rico
Rio Piedras Station, Puerto Rico

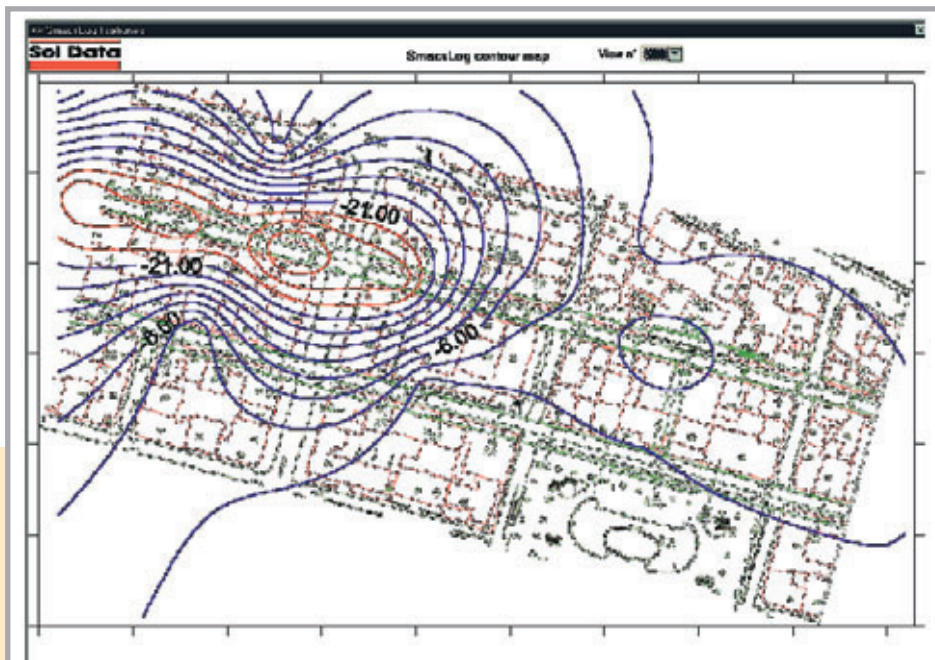


Figure 4 et photo 2
Tunnel de Toulon :
vue de la cuvette
de tassements
en temps réel

Toulon Tunnel :
real-time view
of the subsidence basin

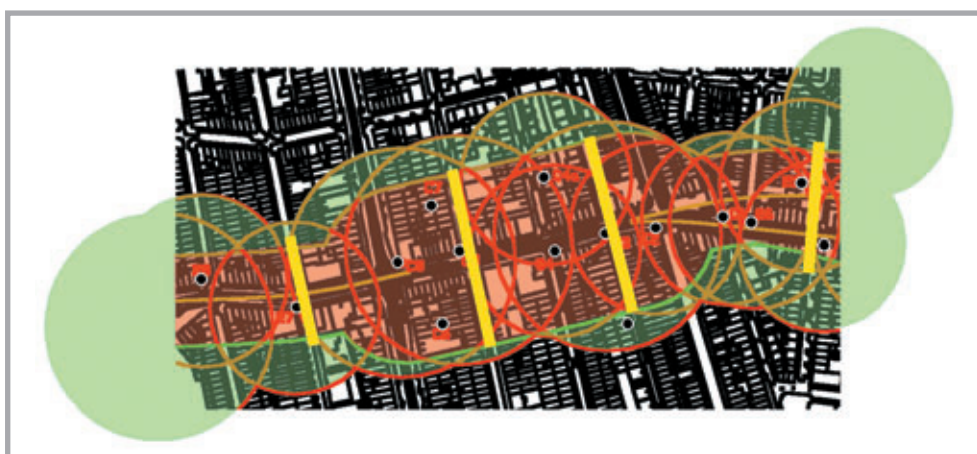
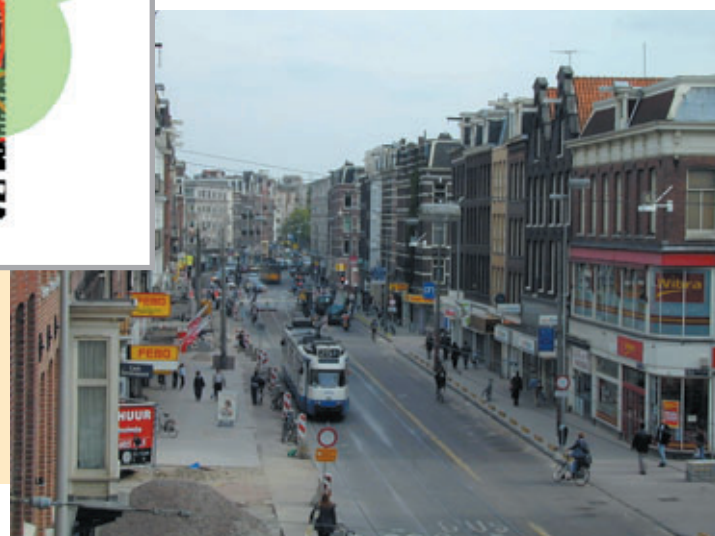


Figure 5 et photo 3
Métro d'Amsterdam : Cyclops évolution. Réseau
topographique temps réel
Amsterdam metro : Cyclops monitoring system.
Real-time topographic grid



veillance de deux Cyclops et de 60 instruments qui permettaient de surveiller en temps réel la cuvette de tassement liée au creusement. Le chantier de plus de 800 m en plein centre-ville ne permettait pas d'envisager la circulation de câbles en tranchées et les câblages dans les immeubles devaient être réduits au maximum (photo 2 et figure 4).

Dans ce contexte SolData a imaginé et mis en œuvre un système de communications radio permettant de récupérer en temps réel sous forme numérique les informations des deux Cyclops et des différents immeubles instrumentés. Cette technologie puissante permet de déployer une instrumentation automatique en site urbain en limitant la gêne des riverains et de supprimer les interfaces avec les concessionnaires de réseaux. Depuis 1998 ces méthodes de communication radio ont été utilisées avec succès sur plusieurs chantiers de tunnels urbains parmi lesquels :

- ◆ métro d'Amsterdam (Pays Bas) ;
- ◆ tunnel de Lefortovo (Russie) ;
- ◆ East West Rail KCRC (Hong Kong) ;
- ◆ métro de Madrid (Espagne) ;
- ◆ Eurostar Kingcross (UK).

■ ÉTAPE N°4

Cyclops évolution - Réseau topographique temps réel

La ligne Nord-Sud du métro d'Amsterdam traverse le centre historique de la ville sur près de 3,8 km et risque d'affecter plus de 1.800 bâtiments et monuments. Les terrains, argile sable et tourbe, ainsi que la vétusté des immeubles baroques fondés sur des pieux en bois ont amené la municipalité à lancer un vaste programme de monitoring. Ce programme s'attache à suivre en temps réel la déformation de tous les immeubles situés le long des deux tunnels et des quatre stations du projet pen-

dant 6 ans. Des profils d'instrumentation géotechnique, des piézomètres, jauges de contraintes et électro-nivelles permettent en outre de compléter les mesures topographiques des Cyclops.

La taille du chantier de monitoring (3800 m x 200 m environ) et le nombre de prismes cibles mesurés en temps réel (près de 6 000 prismes) ont nécessité le développement d'un nouveau concept de Cyclops : Cyclops évolution. En effet les Cyclops situés sur le tracé du projet ne pouvaient viser des points de références à l'extérieur de la zone d'influence des tunnels. SolData avec l'Institut géographique national a développé et mis en œuvre pour résoudre ce problème le Cyclops évolution qui peut travailler en groupe, partageant ses références et tenant compte des informations mesurées par d'autres Cyclops du même groupe. Ainsi la zone à surveiller est couverte par un réseau de 74 Cyclops qui travaillent collectivement et mettent à jour en temps réel globalement un réseau topographique de près de 3,8 km et 6 000 cibles avec une précision de mesure inférieure à 0,9 mm (photo 3 et figure 5). Le chantier d'Amsterdam par son ampleur (6 000 prismes cibles surveillés en temps réel, 3 300 instruments dans le sol et les stations) a été rendu possible par la maîtrise technologique des différentes étapes décrites ci-dessus :

- ◆ outils d'acquisition temps réel ;
- ◆ Cyclops ;
- ◆ communications radio ;
- ◆ Cyclops évolution, réseau topographique temps réel.

■ CONCLUSION

Les grands chantiers de percements de tunnels urbains ont amené un lot d'avancées technologiques importantes qui permettent désormais d'anticiper la réaction des bâtis, de contrôler en temps réel l'influence des travaux, de piloter les rétroactions. SolData, qui a participé à cet effort technologique poursuit le développement d'outils permettant de répondre à la demande toujours croissante d'informations sur le comportement des sols et des structures en temps réel pendant le percement de nouveaux tunnels urbains.

ABSTRACT

Development of real-time monitoring techniques on urban tunnel driving projects

E. Gastine

The rapid development of real-time soil and structure instrumentation techniques makes it possible to put in place rapid feedback loops when digging new urban tunnels. These feedback loops include the monitoring system, and they may involve retrospective validation of the calculation assumptions, additional calculations, a change in tunnel construction methods, preventive consolidation work, or compensation grouting.

This article describes various technological stages covered over the past ten years on major urban tunnel drilling projects (Amsterdam, London, Puerto Rico, Madrid, Hong Kong, Toulon).

RESUMEN ESPAÑOL

Evolución de las técnicas de monitoreo en tiempo real en las obras de perforación de túneles urbanos

E. Gastine

La rápida evolución de las técnicas de instrumentación en tiempo real de suelos y de estructuras permite implantar circuitos rápidos de retroacciones durante la excavación de nuevos túneles urbanos. Tales retroacciones integran el monitoreo y precisan, llegado el caso, una convalidación retrospectiva de las hipótesis de cálculo, así como cálculos complementarios, la modificación de la metodología de ejecución del túnel, trabajos de consolidación preventivos y asimismo, inyecciones de compensación

El artículo presenta diversas etapas tecnológicas superadas desde hace diez años con motivo de las grandes obras de perforación de túneles urbanos (Amsterdam, Londres, Puerto Rico, Madrid, Hong Kong y Toulon).

Le béton dans les travaux

Revêtement d'un tunnel
en voussoirs préfabriqués
en béton

*Tunnel lining with prefabricated
concrete segments*

Les travaux souterrains permettent de réaliser, sous terre, des ouvrages destinés à la circulation des personnes, des véhicules et des marchandises (tunnels routiers et autoroutiers, tunnels ferroviaires, réseau de transport collectif urbain, métro-RER, voiries urbaines souterraines) ou des fluides (galeries et collecteurs d'adduction d'assainissement ou d'évacuation d'eau). Ils concernent aussi les ouvrages de stockage des véhicules (parcs de stationnement souterrains) et d'eau (tunnels réservoir, bassin de stockage d'eaux pluviales), d'exploitation de mines (galeries), de production d'énergie (galerie souterraine d'usines hydroélectriques, galeries hydrauliques, conduites forcées) ainsi que de nombreux autres ouvrages (zones commerciales et gares ferroviaires souterraines, laboratoires souterrains de recherche, stockage industriel souterrain, puits de grande profondeur, etc.).



© NFM - Technologies

Les ouvrages souterrains constituent la solution la mieux adaptée à la création de nouvelles infrastructures en zone urbaine et au franchissement des zones montagneuses.

En zone urbaine, le sous-sol devient une alternative quasi incontournable aux problèmes d'occupation et d'encombrement de surface. La réalisation des travaux en souterrain permet de s'affranchir des obstacles, d'utiliser au maximum l'espace souterrain quasi illimité et de libérer la surface au sol. En zone montagneuse, le développement de moyens de transports ferroviaires à grande vitesse et des réseaux de communication autoroutiers qui ne peuvent épouser le relief (tracé nécessitant de grands rayons de courbure en plan et en profil en long, et de faibles pentes) impose la réalisation de tunnels. Les techniques à base de **cailloux, de mortiers ou de bétons** contribuent à la réalisation d'un grand nombre d'ouvrages souterrains. Elles sont utilisées soit pour permettre ou faciliter la réalisation des ouvrages (injection, soutènement en béton projeté, prévoûte en béton, calage de voussoirs en béton, etc.), soit pour constituer le revêtement définitif des tunnels et des galeries.

■ LES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'EXÉCUTION DES TUNNELS

Quatre principales méthodes d'exécution des tunnels peuvent être utilisées. Le choix de la technique à employer résulte d'un compromis entre les exigences liées à la géométrie de l'ouvrage à réaliser,

les caractéristiques du terrain à creuser, les spécificités du site et de son environnement et les contraintes géologiques et hydrogéologiques (présence ou non de la nappe phréatique).

◆ Tunnel dans le rocher :

- méthode traditionnelle à l'explosif ;
- méthode par attaque ponctuelle.

◆ Tunnel en terrain difficile :

- méthode par prédécoupage mécanique ;
- méthode de creusement au tunnelier.

Les progrès de ces dernières années dans les techniques de creusement, de soutènement et de revêtement permettent maintenant de réaliser des ouvrages dans tous les types de terrain.

La méthode traditionnelle à l'explosif

Cette méthode est adaptée à une roche saine et homogène aux caractéristiques géotechniques élevées. L'abattage à l'explosif nécessite la perforation préalable de trous de mine (constituant la volée) à l'aide de marteaux perforateurs (robots de foration assistés par ordinateur permettant une automatisation intégrale des opérations). Le plan de tir doit être adapté aux caractéristiques du terrain afin d'assurer un découpage soigné de l'excavation et de limiter les ébranlements. Après excavation, la voûte est généralement renforcée par un soutènement, provisoire dans un premier temps à l'avancement des travaux, puis définitif lorsque l'ouvrage est entièrement creusé.

Le choix du soutènement provisoire est fonction de

souterrains

Patrick Guiraud
DIRECTEUR DÉLÉGUÉ GÉNIE CIVIL
CIMbéton

Joseph Abdo
DIRECTEUR DÉLÉGUÉ ROUTES
CIMbéton

l'état des parois, suite aux dégradations provoquées par les tirs d'explosifs et aux déformations liées aux phénomènes de décompression du terrain.



Divers types de soutènement provisoire sont utilisés :

- ◆ boulonnage d'ancrage ;
- ◆ boulonnage associé à un treillis métallique ;
- ◆ boulonnage associé à une faible épaisseur de béton projeté (5 cm) renforcé par un treillis ;
- ◆ boulonnage associé à la mise en place d'un béton projeté jusqu'à 20 cm d'épaisseur ;
- ◆ mise en place de cintres métalliques.

La pose de soutènement est très souvent assurée par des robots. Le béton projeté à fibres métalliques se substitue, de plus en plus, au béton projeté associé au treillis soudé.

Le revêtement définitif est, en général, constitué par une voûte en béton armé, coulée en place sur un coffrage métallique.

La méthode par attaque ponctuelle

Si la roche est friable, l'excavation est exécutée par une machine qui attaque ponctuellement et progressivement le sol (machine à attaque ponctuelle). Ces machines automotrices sur pneus ou chenilles sont équipées de bras orientables, à l'extrémité desquels est placé l'appareil d'attaque (godet excavateur, brise-roche, tête de havage à axe longitudinal ou transversal). Les déblais sont évacués vers l'arrière. La paroi est équipée à l'avancement d'un soutènement provisoire. Cette technique est adaptée à tous les profils d'excavation.



La méthode par prédécoupage mécanique

Cette méthode consiste à réaliser une succession de saignées d'épaisseur 15 à 30 cm et de 3 à 5 m de longueur dont le tracé suit le profil théorique de l'extrados de la voûte à réaliser, à l'aide d'une haiveuse (machine de prédécoupage constituée d'un bâti support rigide auquel est fixé un chariot mobile pouvant se déplacer sur le contour de la section à excaver et équipé d'une scie spéciale).

La saignée est remplie de béton à prise rapide, mis en place par projection (béton projeté par voie sèche et éventuellement armé de fibres métalliques), afin de constituer une voûte porteuse dans le massif encaissant. Après durcissement, cette prévoûte en béton assure le soutènement de la cavité dont le terrassement peut-être entrepris en pleine section. Elle permet d'assurer, pendant les travaux, la sécurité des ouvriers.



Chaque prévoûte a une forme légèrement tronconique pour permettre la réalisation de la prévoûte suivante (recouvrement entre voûtes successives : 0,50 m à 2 m).

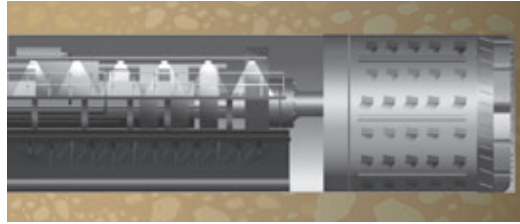
Nota : cette méthode est développée par l'entreprise *Bec Perforex* (système breveté : *prédécoupage du terrain avec mise en place de prévoûtes en béton performant*).

Le béton utilisé est un béton à très haute résistance à court terme. Ces performances sont de l'ordre de 8 MPa à 4 heures et de 24 MPa à 24 heures.

La méthode de creusement du tunnelier

Le creusement mécanisé des tunnels a connu des développements importants durant les vingt dernières années, en particulier grâce à l'apparition et aux évolutions technologiques des tunneliers. Ils ont permis d'élargir le domaine de réalisation des tunnels dans des conditions géologiques délicates, pour une grande gamme de diamètres et de terrains (sols meubles, roches tendres, argiles

**Creusement
au tunnelier**
*Tunnel driving
by TBM*



**Partie avant
du tunnelier**
*Front section
of the TBM*



© NFM - Technologies

**Voussoir préfabriqué
en béton, en cours
de pose**
(vue du tunnelier)

**Prefabricated
concrete segment,
during laying**
(view of TBM)



© NFM - Technologies

molles, terrains instables ou aquifères, etc.) en améliorant considérablement la productivité des chantiers.

Le tunnelier est une machine complexe qui assure en continu les fonctions suivantes :

- ◆ excavation du terrain ;
 - ◆ stabilisation et soutènement du front de taille ;
 - ◆ soutènement provisoire des parois du tunnel juste derrière le creusement ;
 - ◆ évacuation des déblais ;
 - ◆ mise en place du soutènement provisoire ou du revêtement définitif ;
 - ◆ guidage selon l'axe théorique prévu ;
- avancement automatique à l'aide de vérins.

Il permet de creuser des tunnels de diamètre compris entre 2 et 15 m. Il est particulièrement adapté pour le creusement de terrains meubles sur de grandes longueurs (du fait de son coût d'investissement). Sa vitesse d'avancement est de l'ordre de 10 à 50 m par jour.

On distingue trois types de tunneliers, qui sont choisis en fonction de la nature du terrain à creuser.

◆ **tunneliers avec machine d'attaque ponctuelle ou d'attaque globale** (tunneliers à appui radial, alé-seur). Ils sont utilisés dans le cas de terrain de tenue suffisante ne nécessitant pas de soutènement immédiat ;

◆ **tunnelier à boucliers classiques** (à front ouvert, boucliers mécanisés à appui radial, à appui longitudinal, à appui mixte) qui assurent simultanément les fonctions d'excavation et de soutènement latéral du terrain. Ils comportent une structure cylindrique rigide (jupe) qui progresse au fur et à mesure du creusement et assure la stabilité du tunnel. Ils sont utilisés pour le creusement des terrains meubles ;

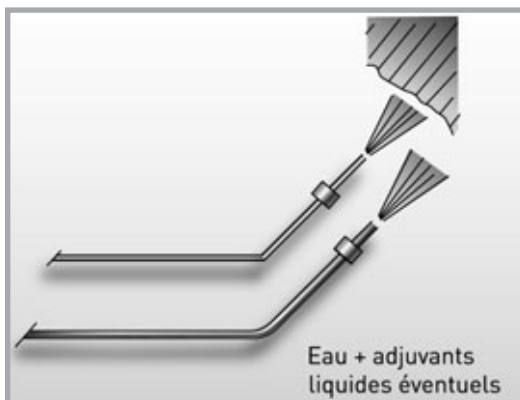
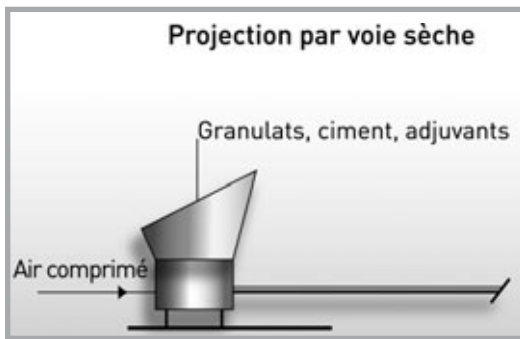
◆ **tunneliers à confinement** (ou à front pressurisé). Ces machines assurent simultanément un soutènement latéral et frontal du terrain. Elles sont utilisées dans les terrains alluvionnaires en présence d'eau (terrain meuble et aquifère). La partie avant du tunnelier (chambre d'abattage) peut être mise sous pression afin d'assurer la stabilité du front de taille. A l'intérieur de la chambre, une roue de coupe munie de dents au carbure de tungstène grignote le terrain. Les déblais sont évacués par marinage hydraulique à l'aide de conduite de marinage et de pompes. Selon le type de terrain, le confinement peut être assuré par de l'air comprimé, par pression de terre ou généralement par une boue bentonique (la boue est formulée en fonction de la granularité et de la perméabilité du terrain). Le soutènement de l'excavation est exécuté par le tunnelier, soit par coulage de béton en place, entre le terrain et un coffrage intégré, soit plus fréquemment par la mise en place de voussoirs préfabriqués en béton. Le tunnelier avance en prenant appui sur la zone bétonnée réalisée à l'avancement.

■ LE BÉTON PROJETÉ

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé.

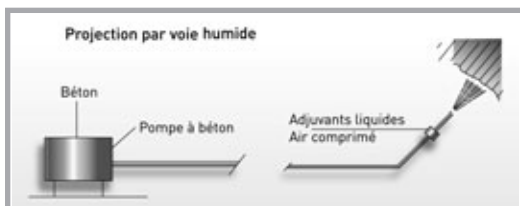
Il existe deux techniques de projection : par voie sèche ou par voie humide. La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors de la fabrication du béton, soit lors de l'application du béton).

Projection par voie sèche : le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateurs de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur. Il est propulsé par de l'air comprimé le long d'une tuyauterie vers la lance de projection. L'eau arrive, séparément à la lance, en quantité nécessaire et réglable pour assurer l'humidification du mélange, juste au moment de la projection sur la paroi. Cette technique est utilisée, en particulier, pour des chantiers de faible importance ou nécessitant des



arrêts fréquents, ou lorsque la distance de transport entre la machine confectionnant le mélange et la lance de projection est importante.

Projection par voie humide : le mélange granulats-ciment-eau est malaxé dans une centrale puis stocké dans une trémie. Il est ensuite pompé le long d'une tuyauterie jusqu'à la lance de projection. La projection est assurée par de l'air comprimé, éventuellement associé à des adjuvants liquides. Cette technique est utilisée, en général, pour des chantiers nécessitant des rendements importants. Ce type de béton doit présenter une grande cohésion. La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de faibles épaisseurs, adhérentes au support, qui épousent parfaitement le profil de l'excavation. Elle est particulièrement adaptée à la réalisation d'ouvrages de sections variables ou d'intersections d'ouvrages et des chantiers sur lesquels il est difficile d'amener un outil coffrant.



Les applications du béton projeté

La technique du béton projeté est utilisée en travaux souterrains comme :

◆ **soutènement de parois de galeries ou de puits** : ce soutènement est mis en œuvre immédiatement après excavation du front de taille ou ultérieurement si le terrain est stable ;

◆ **soutènement provisoire du front de taille de tunnels en cours de creusement** : le béton projeté est, en général, utilisé en association avec des boulons, des cintres ou des treillis. Le béton peut, dans certains cas, être fibré.

Le béton projeté est utilisé en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcement de structures).

Les principaux modes de fonctionnement du béton projeté

Selon la nature du terrain et les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, la technique du béton projeté peut assurer trois principaux types de soutènement :

◆ **peau protectrice** : dans le cas d'ouvrages réalisés dans des terrains suffisamment résistants, le soutènement est constitué d'une faible épaisseur de béton projeté, mis en place à la surface de l'excavation et pouvant être renforcé par un treillis soudé ou des fibres.

Cette "peau protectrice" de 2 à 5 cm d'épaisseur ne joue pas de rôle structurant. La stabilité de l'excavation est assurée par le terrain seul, par un boulonnage du terrain ou par une coque plus épaisse en béton projeté mis en place ultérieurement. La peau protectrice a pour rôle de protéger les terrains en place contre une altération superficielle (desiccation du sol, migration d'eau interstitielle, etc.) en assurant le jointoiment des grains du sol. Les exigences de résistances mécaniques de ce type de béton sont faibles, mais il est indispensable que le béton présente une bonne adhérence au support et supporte son poids propre ;

◆ **peau résistante** : le béton projeté permet un renforcement local du terrain, dans le cas d'ouvrages réalisés dans des terrains peu résistants. Le béton s'oppose, dans ce cas, aux ruptures et déplacements locaux éventuels.

Le soutènement est constitué d'une peau de béton projeté, associé à un treillis soudé, un boulonnage ou des cintres. Sa résistance mécanique à court terme doit être importante (de l'ordre de 10 MPa à 24 heures). Ces résistances élevées à court terme sont obtenues par utilisation d'accélérateur de prise au moment de la projection ;

◆ **anneau de structure** : le soutènement est constitué d'une coque épaisse en béton projeté. Cette coque joue un rôle structural, participe à la stabilité d'ensemble de l'excavation.

Le béton projeté est armé, fibré ou non armé. L'épaisseur minimale de l'anneau est fonction des contraintes d'exécution (hors profil, défauts d'excavation, etc.).

La capacité de fluage du béton projeté au jeune âge lui permet de s'adapter aux déformations du terrain, en maintenant l'excavation en place.

Revêtement d'un tunnel en voussoirs préfabriqués en béton armé

Tunnel lining with prefabricated reinforced concrete segments



© NFM - Technologies

Les constituants du béton projeté

Le béton projeté est constitué d'un mélange :

◆ **de ciment** : le ciment conforme à la norme NF EN 197-1 est choisi en fonction de l'agressivité de l'environnement dans lequel est situé l'ouvrage. Les dosages courants sont compris entre 350 et 450 kg/m³;

◆ **de granulats** : le sable doit contenir le moins possible de grains plats. Le diamètre des plus gros granulats est limité à 15 mm;

◆ **d'eau** : le rapport E/C est, en général, compris entre 0,40 et 0,45;

◆ **d'adjuvants** : on utilise des adjuvants pour béton (super plastifiants) et des accélérateurs de prise ou des "raidisseurs" (silicate de soude) qui permettent d'assurer l'adhérence du béton sur le support, dès sa projection, et d'obtenir des résistances initiales élevées;

◆ **de fibres** : les fibres utilisées sont essentiellement métalliques (parfois synthétiques). Elles permettent, en particulier, d'améliorer la cohésion, la ductilité, la résistance et la tenue du béton projeté sur son support. Le dosage est de l'ordre de 35 à 50 kg/m³;

◆ **d'additions** : des fumées de silice sont parfois utilisées pour améliorer les performances du béton et faciliter la projection en rendant le béton plus collant.

La formulation du béton doit prendre en compte les pertes de matériau par "rebond" lors de la projection et être optimisée pour offrir une bonne aptitude à la projection. Il est préconisé d'augmenter, par rapport à la formulation théorique, le dosage en ciment de 10 à 20 % et pour les granulats, la proportion d'éléments fins.

Les performances, en général, spécifiées sont de l'ordre de 25 MPa pour la résistance à la compression à 28 jours.

La préparation du support

La préparation est fonction du type de support :

◆ **projection sur le terrain** : il convient de décaper l'excavation des éléments instables et de projeter le béton le plus rapidement possible après l'excavation;

◆ **projection sur béton projeté jeune** : la nouvelle projection doit être effectuée dans les 72 heures après la fin de la prise de la couche précédente;

◆ **projection sur support existant en béton ou en maçonnerie** : la préparation consiste à repiquer le support afin d'éliminer les éléments instables puis à le nettoyer par projection d'eau à haute pression. Dans tous les cas, il convient de mouiller le support juste avant la projection pour éviter qu'il n'absorbe une partie de l'eau du béton frais.

LES TECHNIQUES DE PRÉSOUTÈNEMENT

Les techniques de présoutènement permettent de traverser des zones difficiles, dans des terrains de faible cohésion.

Le présoutènement est un soutènement mis en place à la périphérie de la section à excaver en avant du front de taille.

On distingue trois types de présoutènement :

◆ **la voûte parapluie** : c'est une voûte constituée de tubes métalliques disposés en couronne suivant le contour de la section à excaver et prenant appui sur des cintres;

◆ **la prévoûte** : c'est une voûte réalisée dans le terrain en avant du front de taille. Elle est constituée soit de béton mis en œuvre dans une saignée réalisée par prédécoupage mécanique, soit de colonnes de jet grouting juxtaposées;

◆ **l'anneau renforcé** : la technique consiste à renforcer un anneau de terrain, en avant de l'excavation, par des boulons injectés de coulis de ciment.

LES TECHNIQUES DE SOUTÈNEMENT

Le creusement d'un tunnel peut nécessiter, selon la technique utilisée, la nature du terrain et les dimensions de l'ouvrage, la réalisation d'un soutènement de l'excavation.

Ce soutènement permet d'assurer la sécurité des ouvriers intervenant sur l'ouvrage, de limiter les déformations du terrain, de stabiliser les parois pendant la réalisation des travaux et de renforcer la stabilité définitive de l'excavation.

Les techniques les plus couramment utilisées sont :

◆ des soutènements métalliques : cintres métalliques, blindage, boulons;

◆ des soutènements en béton : béton projeté, prévoûte en béton;

◆ des soutènements mixtes : cintres réticulés associés à du béton projeté. Le cintre permet de suppléer la faiblesse de résistance du béton aux jeunes âges.

Une nouvelle méthode de soutènement s'est développée ces dernières années. Elle permet de garantir la stabilité de l'excavation en créant un anneau porteur mais déformable de terrain armé. L'excavation est réalisée en pleine section ou en demi-section. Le soutènement, mis en place immédiatement après le creusement, est constitué de boulons armant le terrain et d'une coque mince en béton projeté, armée d'un treillis soudé ou de fibres métalliques, et éventuellement de cintres. Ce soutènement léger présente une souplesse suffisante pour accepter les déformations du terrain.

Le revêtement de l'ouvrage est mis en œuvre ultérieurement par plots successifs.

■ LES REVÊTEMENTS EN BÉTON DES TUNNELS

Le revêtement d'un tunnel ou d'un ouvrage souterrain est la structure résistante placée au contact de l'excavation. Il permet d'assurer la stabilité mécanique à long terme de l'ouvrage et de contribuer à son étanchéité (protection contre les venues d'eau dans le cas d'ouvrage réalisé dans des terrains aquifères). Il peut être visible de l'intérieur de l'ouvrage ou protégé par un habillage.

On distingue deux principales techniques de réalisation des revêtements selon le procédé d'excavation utilisé :

- ◆ revêtement en béton coffré non armé ;
- ◆ revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé.

Le profil en travers type d'un revêtement est, en général, de forme circulaire (ce qui permet de résister le mieux possible en compression aux efforts exercés par le terrain).

Dans le cas d'un terrain présentant de bonnes caractéristiques mécaniques, d'autres types de sections sont possibles (section constituée d'une voûte, de piédroits et d'un radier).

Revêtement en béton coffré non armé

Après excavation du terrain par la méthode traditionnelle à l'explosif, par attaque ponctuelle ou par prédécoupage mécanique, le revêtement est, en général, constitué d'une voûte en béton coulée en place.

Ce revêtement est généralement non armé (sauf éventuellement dans les zones particulièrement sollicitées : jonction radier piédroit). L'épaisseur du revêtement, fonction du type du terrain excavé, varie entre 30 et 45 cm.



© NFM - Technologies

Revêtement d'un tunnel en béton coffré

Shuttered concrete tunnel lining

Le béton a, en général, une résistance en compression de l'ordre de 30 MPa. Le bétonnage est réalisé par plots d'une dizaine de mètres de longueur après mise en place, au contact de l'excavation, d'un complexe d'étanchéité.

Les principales spécifications du béton portent sur la maniabilité à l'état frais, afin de garantir un parfait remplissage du coffrage et sur la compacité, afin de résister à l'agressivité du milieu ambiant. Ces performances mécaniques doivent permettre la réalisation d'un plot par jour (ordre de grandeur des résistances requises : 10 MPa à 24 heures). La réalisation d'ouvrages à gabarit limité, d'accès difficile ou de géométries complexes, nécessite la mise en œuvre du béton par pompage. Dans ce cas, les critères de formulation du béton doivent prendre en compte sa pompabilité, son homogénéité et l'absence de ségrégation en extrémité de conduite ainsi que la durée pratique d'utilisation en fonction de la distance de pompage.

On utilise aussi, de plus en plus, des bétons autoplaçants qui facilitent la mise en œuvre du béton et permettent d'obtenir, sans vibration, un parfait remplissage des coffrages.

Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé

Le revêtement de tunnel, foré à l'aide d'un tunnelier, est composé d'une succession d'anneaux juxtaposés mis en place à l'arrière du bouclier pour assurer immédiatement la stabilisation des terres. Chaque anneau est constitué d'un assemblage d'éléments appelés **voussoirs préfabriqués en béton armé**, d'épaisseur courante de 20 à 30 cm.

Les anneaux, d'une longueur de 0,60 à 2 m ont des faces transversales parallèles (anneaux droits) ou non parallèles (anneaux universels). Les anneaux universels permettent, par rotation de la position d'un anneau par rapport au précédent, de suivre toutes les variations de tracé de l'excavation.

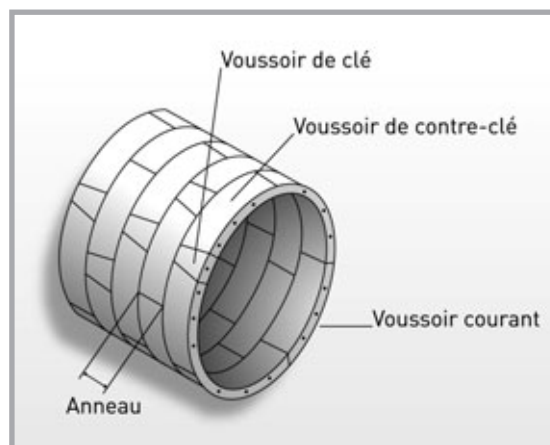
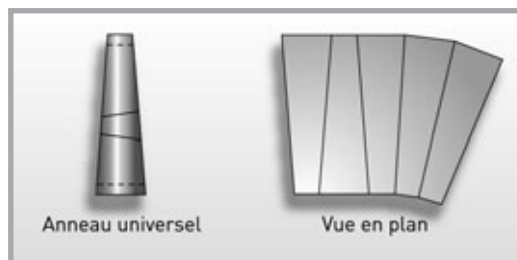
Aire de stockage
de voussoirs préfabriqués
en béton

Storage area
for prefabricated concrete
segments



© NFM - Technologies

Succession
d'anneaux universels
Series of universal
rings



Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé : schéma de principe d'assemblage

Lining with prefabricated reinforced concrete segments : schematic diagram of assembly



Les anneaux sont constitués de 5 à 10 voussoirs courants, de deux voussoirs de contre-clé et d'un voussoir de clé (de forme trapézoïdale). L'étanchéité entre voussoirs est, en général, assurée par des profilés compressibles ou hydrogonflants.

Les voussoirs sont équipés de réservations qui permettent leur assemblage entre eux et aux anneaux adjacents par des boulons ou par des tire-fonds.

Les voussoirs préfabriqués peuvent être réalisés en bétons renforcés de fibres métalliques. Ce type de béton permet, en particulier, d'améliorer la résistance au choc et le comportement vis-à-vis de la corrosion des voussoirs, et de simplifier le processus de fabrication industrielle des voussoirs (simplification voire suppression des ateliers de façonnage et d'assemblage des armatures).

Pour des voussoirs de grande taille et soumis à des sollicitations élevées, les voussoirs peuvent être armés par une solution mixte (association de fibres métalliques et d'armatures traditionnelles). Des essais réalisés sur des bétons armés avec des fibres polypropylènes (à des dosages de 1,5 à 2 kg/m³) ont démontré l'efficacité de ces fibres pour diminuer les risques d'éclatement du béton lorsqu'il est soumis à des températures élevées. Les ciments utilisés pour la confection des bétons des voussoirs sont, de préférence, de type CEM I. Dans le cas de tunnels réalisés dans les milieux agressifs, des ciments de caractéristiques complémentaires PM et ES sont conseillés.

Le vide annulaire, situé entre l'extrados de l'anneau du revêtement et l'excavation, doit être soigneusement rempli par un produit de bourrage. Ce produit est destiné, à court terme, à caler le revêtement et à éviter les déplacements des voussoirs et le mouvement éventuel du terrain excavé. A long terme, il permet de répartir uniformément les efforts engendrés sur le revêtement par le terrain. Cette opération s'effectue par injection d'un coulis de ciment (parfois associé à de la bentonite) simultanément à l'avancement du bouclier et à la mise en place des voussoirs. Ce coulis de bourrage est injecté au travers d'orifices localisés dans les voussoirs. Il doit être suffisamment fluide lors de la mise en œuvre pour remplir parfaitement le vide et sa cinétique de prise doit être adaptée aux conditions de chantier.

■ LES HABILLAGES DES TUNNELS À L'AIDE DE COQUE MINCE EN BÉTON

Les "habillages" des tunnels sont des structures légères destinées :

- ◆ dans le cas des tunnels non revêtus : à assurer la sécurité des usagers contre les chutes éventuelles de blocs du terrain ;

- ◆ dans le cas de tunnels revêtus : à améliorer l'esthétique de l'ouvrage et le confort des usagers, et à faciliter le nettoyage des parois.

Cet habillage peut être réalisé, en travaux neufs ou en travaux de réfection, à l'aide d'une coque mince en béton qui est, soit accrochée à la voûte, soit auto-stable et reposant sur des piédroits en béton. Les traitements architectoniques du béton de la coque permettent d'améliorer l'ambiance intérieure de l'ouvrage.

■ LES TECHNIQUES DE RÉPARATION DES TUNNELS

Il existe de nombreuses techniques pour réaliser les travaux de réparation ou d'entretien des tunnels. Le choix de la technique est fonction du type

d'ouvrage et de l'importance des dégradations.

Les injections : pour la réhabilitation des ouvrages (l'étanchement des revêtements).

Le boulonnage : pour l'amélioration par des armatures des caractéristiques du terrain.

Le béton projeté : pour le renforcement des revêtements (béton projeté de fibres métalliques ou associé à un treillis soudé).

Le renforcement par anneaux séparés : par la mise en place d'anneaux de voussoirs en béton armé dans les zones dégradées.

La reconstruction du revêtement : par la mise en place d'un nouveau revêtement en béton coulé en place.

Le chemisage du revêtement : par la mise en place de coques préfabriquées de faible épaisseur (liaison avec l'ancien revêtement à l'aide d'un coulis de ciment injecté).

■ LES PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT DES TRAVAUX SOUTERRAINS

Les travaux souterrains devraient, dans les prochaines décennies, se développer en France, en particulier pour répondre aux besoins considérables en équipement en matière d'eau et assainissement pour la réalisation :

- ◆ de stations d'épuration souterraines en site urbain ;
- ◆ de réseaux d'adduction et de collecte des eaux ;
- ◆ de tunnels réservoir ou de bassins d'eaux pluviales (pour lutter contre les inondations et retenir les pollutions dues aux matières en suspension, en cas d'orages).

L'urbanisation croissante, l'augmentation de la densité du tissu urbain et de la valeur de l'espace en zone urbaine, la raréfaction des espaces disponibles, le souci de réduire les nuisances des riverains lors des travaux, la sensibilité de la population à l'environnement vont imposer le développement de réseaux routiers urbains, de parkings et d'infrastructures de transports en souterrain.

Le recours aux techniques des travaux souterrains va s'imposer pour des raisons écologiques. D'abord par volonté de ne pas surcharger l'espace urbain, de supprimer les impacts sur l'environnement et de préserver les paysages naturels. Ensuite par souci de protection de l'environnement en surface, de réduction des nuisances en cours de travaux et de préservation des espaces verts.

Ces techniques permettent de répondre aux problèmes de plus en plus complexes posés par l'insertion d'ouvrages dans l'espace des grandes agglomérations urbaines, en utilisant la protection naturelle (mécanique, thermique, hydraulique) apportée par le sol et en concevant, sans aucun obstacle physique, des ouvrages en trois dimensions. Les techniques de reconnaissances géotechniques



L'une des deux gares souterraines du RER E

One of the two underground rail stations of RER E

© DTR

préalables, de suivi en cours de chantier et le développement des outils d'analyses mathématiques, permettent de limiter désormais les risques lors de la réalisation des ouvrages, de diminuer les incertitudes sur les coûts et de mieux maîtriser les aléas de chantier.

Les évolutions des techniques et des matériels de creusement (en particulier des tunneliers) permettent d'envisager le creusement de tunnels de plus en plus longs dans des conditions géologiques de plus en plus délicates (terrain hétérogène, sol meuble et aquifère, etc.) avec des cadences d'excavation de plus en plus élevées, une plus grande fiabilité et une plus grande sécurité pour les ouvriers.



Documents de référence - Sources d'information

- ◆ Dossier pilote des tunnels (CETU - Juillet 1998).
- ◆ Recommandations de l'AFTES : *Tunnels et ouvrages souterrains*.

AUTOFONÇAGE[®], AUTORIPAGE[®]

Bientôt le 100^e pont!

Bientôt 100 ponts mis en place en 15 ans, la possibilité de riper n'importe quelle charge (nous avons en étude un ouvrage de 14 000 t) sur n'importe quel terrain, sous voies ferrées, autoroutes ou routes; les méthodes L'AUTOFONÇAGE[®], L'AUTORIPAGE[®] et leurs additifs ont apporté la preuve de leur caractère innovant et de leur fiabilité, à la condition évidente de réaliser les ouvrages provisoires, radier de guidage et inserts du radier de l'ouvrage, selon les règles de l'art (qualité des matériaux et leur mise en œuvre) et de respecter les tolérances de réalisation imposées par les procédés.

JMB MÉTHODES continue ses recherches pour diminuer encore les perturbations du trafic en réduisant les délais de mise en place par optimisation des tâches élémentaires, des phases de travaux, des formes des ouvrages et des moyens de terrassement et de translation.

Voici quinze ans, lorsque naquit la société JMB MÉTHODES et qu'elle déposa ses premiers brevets, elle n'aurait jamais imaginé – malgré son enthousiasme –, un tel développement.

Des passages souterrains de Champigny-sur-Marne pesant 200 t l'unité, qui lui ont d'ailleurs valu d'être lauréat du Prix de l'Innovation 1984, aux ouvrages très importants approchant les 10 000 t, la route, ou plutôt la voie ferrée a été longue.

LES PRINCIPALES ÉTAPES DE L'ÉVOLUTION DE LA TECHNIQUE

L'AUTOFONÇAGE[®]

Cette méthode, bien connue maintenant, consiste à réaliser de chaque côté de la voie à traverser deux radiers de guidage dans lesquels seront construits deux demi-cadres, la somme de ces demi-cadres, un fois accostés, étant l'ouvrage définitif.

En effet, hormis les radiers de guidage il n'y a pas d'autre ouvrage provisoire (pour servir de massif de réaction par exemple). La liaison des deux demi-cadres est assurée par des câbles de précontrainte, ou plus précisément de traction, traversant les piédroits de l'ouvrage et le remblai. Des trous horizontaux forés horizontalement dans le remblai et gainés de tube plastique serviront au passage de ces câbles. Un vérin, de 1 000 t en général, est fixé sur un des deux demi-cadres, à l'autre extrémité, sur l'autre cadre, est monté un ancrage passif. Le

vérin tire sur le câble en prenant appui sur le demi-cadre, par réaction c'est celui-ci qui avance. Les avantages de cette méthode sont la suppression du (ou des) massif(s) de réaction, chaque demi-cadre jouant alternativement ce rôle, les efforts de traction sont divisés par deux et il n'y a plus de phénomène d'entraînement du talus lorsque l'ouvrage foncé débouche. On peut exécuter des ouvrages sous voies ferrées, autoroutes ou routes avec ou sans tablier auxiliaire pour les VF, avec ou sans renfort pour les chaussées. Ce choix du renforcement est lié à la nature du terrain et au rapport existant entre la largeur de l'ouvrage et l'épaisseur de la couverture de remblai sur l'extrados de la dalle. Une pelle excave les terres à l'intérieur du cadre en cours de fonçage. Les avant-becs et le front de taille sont inclinés à 45°. Pour certains ouvrages en terrain sablonneux, la pente de ces avant-becs était à 35°. La vitesse d'avancement est de l'ordre de 50 cm à l'heure. Avec cette méthode, le trafic de la voie à traverser n'est pas interrompu. Sous voies ferroviaires, le principe de réalisation est le suivant : pose des tabliers auxiliaires un week-end, AUTOFONÇAGE[®] des demi-cadres dans la semaine et enlèvement des TA le week-end suivant.

Lorsque des deux demi-cadres sont en contact, on réalise le clavage du radier et des voiles; à noter que les circulations peuvent être rétablies sur l'ouvrage avant clavage des demi-cadres.

L'AUTORIPAGE[®]

Par suite logique, certains ouvrages très biais ou n'offrant pas la possibilité d'être construits en deux éléments nous ont conduits à créer la technique de L'AUTORIPAGE[®] qui permet elle aussi de s'affranchir des massifs de réaction, d'où le mot Auto du grec Autos = Soi-même.

L'ouvrage monolithe est construit sur un radier de guidage d'un côté ou l'autre de la voie à franchir, les câbles de traction sont fixés à l'avant du radier de guidage. On a donc un système de force fermé. La première solution était d'avoir des câbles extérieurs à l'ouvrage ancrés à l'avant dans des profils scellés verticalement dans le radier de guidage et à l'arrière dans des oreilles en BA ou des profils métalliques solidaires du radier du cadre. L'effort de traction qui est le poids de l'ouvrage x coefficient de frottement x coefficient de sécurité est multiplié par 1,2 pour obtenir la valeur de la réaction. Cette réaction est reprise d'abord par le poids du radier de guidage, y compris le béton de

AUTOFONÇAGE[®]. SNCF Nantes. Déviation de Virolet, un demi-ouvrage d'art de chaque côté des voies

AUTOFONÇAGE[®]. SNCF (French Rail) Nantes. Virolet bypass, a half-structure on either side of the tracks





SNCF Lille. Armentières.
AUTOFONÇAGE® + AUTORIPAGE®
avec câbles sous radier
sous 4 voies ferrées

SNCF (French Rail) Lille.
Armentières. AUTOFONÇAGE®
+ AUTORIPAGE® with cables
below foundation raft
under four railway tracks

propreté, x par un coefficient de frottement fonction de la nature du terrain, puis par la butée sur une ou plusieurs bèches dont la forme a été mise au point par JMB MÉTHODES et qui fait partie de sa propriété industrielle. Cette technique avec câbles extérieurs fonctionne très bien pour des ouvrages dont le poids est inférieur ou égal à 1 500 t.

La deuxième solution s'applique à des ouvrages sans limite de poids. En projet pour 2006, un ouvrage de 14 000 t à ripper!

L'idée est d'utiliser la qualité première du béton, le travail en compression. Pour ce faire, les câbles de traction ne seront plus à l'extérieur de l'ouvrage mais entre le radier du cadre et le radier de guidage.

Un premier essai a été réalisé sur le pont-rails de Boismorand, construit par Demathieu & Bard. Les câbles étaient logés dans des saignées pratiquées dans le radier de guidage. A l'avant de celui-ci, des déviateurs passifs donnaient une courbure aux câbles de manière à ce que les efforts des ancrages passifs puissent être répartis dans une poutre. Chaque de ces poutres vient en appui sur une bêche telle que celle définie précédemment. Il peut y avoir plusieurs bèches en fonction des efforts à reprendre et de la nature du sol. Elles seront espacées d'au moins une dizaine de mètres pour éviter l'effet de masque. Chaque câble a son propre déviateur passif et sa propre poutre pouvant, d'ailleurs, être jumelée avec la poutre d'un câble voisin. Il est allongé dans la saignée pratiquée dans le radier de guidage et remonte dans un déviateur noyé dans une poutre symétrique à celle de l'ancrage passif solidaire du radier du cadre, c'est l'ancrage actif. Les vérins de traction sont fixés à l'arrière de ces poutres.

L'opération a parfaitement fonctionné, mais l'entreprise nous ayant fait part des difficultés de réalisation de ces saignées qui, de plus, recevaient le

coulis lubrifiant au cours du ripage, nous avons modifié la position des câbles pour les ouvrages suivants.

Le deuxième essai a été appliqué au pont-rail de la Pénétrante ouest de Troyes réalisé par GTM. Les câbles de traction ne cheminaient plus dans des saignées pratiquées dans le radier, mais dans des "boîtes à câbles" solidaires du radier du cadre.

Les déviateurs ne sont plus de simples tubes centrés mais des pièces mécano-soudées qui transforment, au fur et à mesure de la courbure du câble, une position circulaire des torons en une position rectangulaire. Les torons ne seront plus disposés circulairement mais à plat sur trois rangées dont la hauteur totale est de 13,5 mm. A la sortie des déviateurs (symétriques) ils sont allongés dans les boîtes à câbles. Le fond de ces boîtes est le radier de guidage lui-même, les côtés des cornières de 50 x 50 fixées au radier par des vis en plastique (qui cassent au démarrage) et le couvercle est une tôle pliée avec connecteurs.

Ces deux systèmes font l'objet d'un brevet européen.

La vitesse d'avancement est comprise entre 6 et 9 ml/heure.

■ ASSOCIATION DES DEUX MÉTHODES

En AUTOFONÇAGE® on découpe le terrain sur les côtés du front de taille de manière à n'enlever que le strict nécessaire au passage du cadre.

En AUTORIPAGE® les circulations sont coupées, les terrassements se font en grande masse en respectant les normes de sécurité (1/1), il faut d'ailleurs remblayer les parties latérales lorsque l'ouvrage est en place comme pour les systèmes traditionnels de ripage sur longrines. L'association des deux

**EPA Senart/Thales.
AUTORIPAGE® Pro
sous RD 50
à Combs-la-Ville.
Câbles extérieurs**

**EPA Senart/Thales.
AUTORIPAGE® Pro
under highway RD 50
in Combes-la-Ville.
Exterior cables**



AUTORIPAGE® avec travées d'approche

Tous les systèmes de ripage traditionnels imposent l'ouverture d'une fouille dont les côtés sont à 45°. Une fois l'ouvrage en place il faut remblayer ces côtés par passes de 20 à 25 cm soigneusement compactées. La durée de cette opération est de l'ordre de 12 à 15 heures, avec risque de tassements ultérieurs.

JMB MÉTHODES a donc créé les "travées d'approche". Les perrés traditionnels sont ici remplacés par deux bracons inclinés à 45° et le tablier est allongé de deux travées supplémentaires venant s'encaster au sommet de ces bracons. A leur base les bracons, coulés en place ou préfabriqués, sont encastés dans le radier. En coupe transversale l'ouvrage a la forme d'un gros voussoir. Il n'y a plus de mur en aile ou en retour. Les quantités de béton mises en œuvre pour les deux travées supplémentaires et les bracons sont sensiblement les mêmes que pour celles d'un ouvrage sans travée d'approche avec murs en aile. Par contre, on gagne les 12 heures nécessaires aux remblaiements latéraux, la fourniture des remblais et on s'affranchit totalement des risques de tassements futurs. Le réglage des terrassements en cours de ripage se fait par lasers tournants, un horizontal pour le réglage du plan de glissement, les deux autres inclinés à 45° pour les côtés. Un jeu de 10 cm environ est laissé, sur les côtés, entre l'intrados des bracons et le terrain en place.

Ce jeu sera comblé, en fin de ripage, par un béton avec fluidifiant dosé à 400 kg qui permet d'obtenir rapidement une résistance au moins équivalente à celle du terrain.

Ces ouvrages sont très aérés et élégants et offrent une visibilité sécurisante pour l'utilisateur.

A noter que les travées supplémentaires peuvent servir aux passages des piétons (à l'abri des circulations) ou de concessionnaires (Reims, Chateaudun, etc.) ou, comme à Troyes, de "bac à arbres".

Cette solution est également brevetée et a beaucoup de succès puisque nous avons réalisé à ce jour treize ouvrages de ce type et plusieurs autres sont en projet en France et à l'étranger.

CONCLUSION

Ces procédés de mise en place sont très fiables, à la condition d'une exécution rigoureuse des éléments propres à la méthode, en particulier le radier de guidage et du respect de la qualité des matériaux préconisés et de leur mise en œuvre. Malheureusement, certaines entreprises n'appliquent pas ces règles qui sont pourtant l'essence même de notre profession.

A ce jour nous avons déplacé près de 200 000 t de



**DDE 77. RD 406, pénétrante
Ouest Walt Disney.
AUTORIPAGE® avec câbles
sous radier + travées
d'approche**

**DDE 77. County road RD 406,
Walt Disney western radial
road. AUTORIPAGE® with cables
under deck + approach spans**



méthodes permet de construire l'ouvrage d'un seul côté, de le pousser en prenant appui sur le radier de guidage, comme en AUTORIPAGE® et de terrasser le strict nécessaire au passage du cadre. JMB MÉTHODES a réalisé entre autres, les ponts de Costour à Brest (SNCF Rennes), la suppression du PN 109 au Mans (SNCF Nantes) du PS du Boulevard Victor et le Pra de Méré (SNCF Paris Rive Gauche), du Pra d'Armentières (SNCF Lille), deux cadres de 4 000 t foncés à Haïfa en Israël, deux cadres de 2 000 t à Buenos Aires en Argentine, deux cadres en Belgique (KW 10 et Kinkempois) un cadre de 4 000 t pour Eurostar réalisé par la société Geoffroy Osborne Id.

La vitesse d'avancement varie en fonction des possibilités de terrassement de 0,50 m/h à 2,50 m/h. On gagne ainsi les remblais latéraux et la possibilité de poser des tabliers auxiliaires puisqu'on limite la brèche.

béton sur tous les types de terrain, avec des biais pouvant aller jusqu'à 23° à l'horizontale, en montée ou en descente avec des pentes jusqu'à 8°. Un contrat d'exclusivité lie JMB MÉTHODES à VSL France qui assure avec compétence la traction de nos ouvrages.

Nous avons réalisé des AUTOFONÇAGES® et des AUTORIPAGES® en Argentine, Israël, Pologne, Angleterre, Belgique, Luxembourg, Hollande et Espagne. Beaucoup de pays européens sont difficiles à pénétrer car ils privilégient leurs propres techniques, parfois moins performantes. La France, par contre, fait quelquefois appel à ces techniques étrangères pour éviter des "situations de monopole".

C'est dommage car nous pourrions encore faire évoluer ces méthodes en travaillant de concert, mais n'est-il pas vrai que la France a toujours été une terre d'accueil!

Nous fêterons comme il se doit (avec quelle entreprise ?) ce prochain 100^e pont.

ABSTRACT

**AUTOFONÇAGE® and AUTORIPAGE®.
Soon the 100th bridge!**

J.-M. Beauthier

Soon 100 bridges set up in 15 years, potential for shifting any load (we are currently designing a 10,000-tonne structure) on any type of land, under railway lines, motorways or roads; the L'AUTOFONÇAGE® and L'AUTORIPAGE® methods and their additional techniques have proved their innovative nature and their reliability, on condition, of course, that the temporary structures, guiding foundation raft and raft inserts for the structure, be executed in accordance with standard engineering practice (quality and processing of materials) and that the construction tolerances required by the processes be complied with.

JMB Méthodes is continuing its research to further attenuate traffic disturbance by shortening installation completion times through optimisation of elementary tasks, work phases, structure forms, and earthworks and shifting facilities

RESUMEN ESPAÑOL

**AUTOFONÇAGE® y AUTORIPAGE®.
El centésimo puente dentro de poco...**

J.-M. Beauthier

Dentro de breve plazo, 100 puentes construidos en 15 años, ya que la posibilidad de los desplazamientos laterales de todo género de cargas (tenemos en estudio una estructura de 10 000 toneladas) y ello en cualquier género de terreno, bajo las vías férreas, autopistas o carreteras. Los métodos de L'AUTOFONÇAGE® y L'AUTORIPAGE® y sus aditivos han venido a aportar la prueba de su carácter innovador y su fiabilidad, con la condición primordial de ejecutar las estructuras provisionales correspondientes, soleras o zampeados de guiado de la estructura, acorde a las buenas reglas profesionales (calidad de los materiales y su implementación) y, asimismo, respetar las tolerancias de ejecución impuestas por los procedimientos de que se trata.

JMB Méthodes continúa sus investigaciones para disminuir más aún las perturbaciones causadas al tráfico, al reducir los plazos de implementación mediante la optimización de las tareas elementales, de las etapas de las obras,

de las formas de las estructuras y de los medios para movimientos de tierras y de translación.