

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

TRAVAUX SOUTERRAINS. LE TUNNEL PRADO SUD A MARSEILLE. UN TUNNELIER SOUS LES VOIES SNCF : COLLECTEUR VL9 LOT 2 DANS LE VAL-DE-MARNE. LA BUSSIÈRE ET CHALOSSET : DEUX TUNNELS TRÈS « REACTIFS ». TRAMWAY T6 STATIONS ET TUNNEL DE VIROFLAY. LGV EST EUROPÉENNE, TUNNEL DE SAVERNE. PASSAGE SOUS LE PONT DES LIONS A SOFIA

N° 894 JANVIER/FÉVRIER 2013



© CHRIS3D -
FOTOLIA.COM



Directeur de la publication
Patrick Bernasconi

Directeur délégué
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03
Email : morgenthalerm@fnftp.fr

Comité de rédaction
Jean-Bernard Datry (Setec TPI),
Stéphane Monleau (Solétanche
Bachy), Louis Marracci (Bouygues),
Jacques Robert (Arcadis ESG),
Anne-Sophie Royer (Vinci Construction Grands Projets), Claude
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion
(Systra), Michel Duviard (Egis),
Florent Imbert (Razel), Michel
Morgenthaler (FNTP)

Ont collaboré à ce numéro
Rédaction
Monique Trancart, Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copemic - 20 av. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22
Fax : +33 (0)1 40 94 22 32
Email : revue-travaux@cometcom.fr

France (10 numéros) : 190 € TTC
International (10 numéros) : 240 €
Enseignants (10 numéros) : 75 €
Étudiants (10 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité
Emmanuelle Hammaoui
9, rue de Berri
75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 41
Email : ehannaoui@fnftp.fr

Site internet : www.revue-travaux.com

Réalisation et impression
Com'1 évidence
Immeuble Louis Vuitton
101, avenue des Champs-Élysées
75008 PARIS
Tél. : +33 (0)1 82 50 95 50
Email : contact@com1evidence.com

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

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

Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°01116 T 80259
ISSN 0041-1906

TRAVAUX SOUTERRAINS : CONDITIONS DE PLUS EN PLUS DIFFICILES MATÉRIEL ET MÉTHODES DE PLUS EN PLUS PERFORMANTS



© BR

Les tunnels et cavités souterraines permettent souvent de résoudre les problèmes posés par l'implantation d'ouvrages et de réseaux dans des sites où la surface est déjà très occupée ou dont la topographie est accidentée.

Malheureusement, les espaces souterrains sont eux-mêmes de plus en plus occupés, notamment dans les grandes villes :

- Les couches de terrain les plus favorables ne sont plus accessibles pour la réalisation de nouveaux ouvrages souterrains ;
- Ces nouveaux ouvrages doivent être réalisés dans des configurations géologiques de plus en plus complexes et défavorables sans endommager les ouvrages voisins (en surface ou en sous-sol), sans perturber leur exploitation, sans faire de bruit, sans perturber la circulation par des transports de déblais, sans polluer les nappes voisines, sans évacuer des eaux ou des déblais pollués ; tout cela en améliorant la sécurité et les conditions de travail sur le chantier, tout en diminuant la durée des travaux et leur coût.

Heureusement, les conceptions, les méthodes d'exécution et les matériels de travaux souterrains progressent aussi vite, voire plus vite, que la difficulté des problèmes à résoudre :

- Les tunneliers permettent d'atteindre des cadences élevées et, lorsqu'ils sont à pression (de terre ou de boue), permettent de travailler sous nappe, en produisant des tassements très faibles en surface. La possibilité de transmettre, en temps réel, de nombreux paramètres de creusement, non seulement au pilote de la machine, mais aussi

par internet, permet de faire intervenir, à tout moment, des experts, même s'ils ne sont pas présents sur le chantier ;

- Les explosifs à deux composants permettent d'éviter le problème, autrefois si contraignant, du stockage à proximité du chantier ;
- Les foreuses à longue course permettent de réaliser des boulons très longs de soutènement de front et, par conséquent, des sections plus grandes dans les mauvais terrains ;
- Les traitements de sol, du type jet grouting, ont grandement amélioré les possibilités d'excaver des terrains médiocres ;
- Les injections de compensation, utilisées, pour la première fois en France, à Toulon, avec succès, après avoir été développées dans d'autres pays, permettent de limiter considérablement les tassements de surface et d'excaver sous des bâtiments très fragiles ;
- Les moyens de surveillance du bâti de surface se sont considérablement améliorés avec automatisation des mesures, traitement informatique et transmission par internet à tous les intervenants, y compris les experts qui ne sont pas présents sur le chantier.

Les expériences et les progrès sont mis en commun grâce à des associations telles que l'AFTES ou l'ASQUAPRO qui diffusent des informations et des recommandations. Le Centre d'études des tunnels (CETU) et les autres services techniques de l'administration (CETE) jouent un rôle de premier plan par la rédaction de règlements techniques, de recommandations et de dossiers-pilotes. Enfin les organismes d'enseignement et recherche à un bout de la chaîne, comme les fabricants de matériels et les entreprises, à l'autre bout, font progresser, chaque jour, la conception et la réalisation des ouvrages souterrains.

Bien que les ouvrages réalisés soient, par nature, discrets et peu spectaculaires, leur conception et leur réalisation sont passionnantes et ouvrent des perspectives nouvelles d'aménagement de l'espace souterrain, comme les illustrent les projets prévus en France : Éole, le Grand Paris, Lyon-Turin ferroviaire etc.

MICHEL LÉVY
INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS-ET-CHAUSSEES EN RETRAITE
EXPERT AUPRES DE LA SETEC

CONTRIBUER À LA VILLE DURABLE DE DEMAIN PAR DES AMÉNAGEMENTS EN SOUTERRAIN

L'ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN EST UNE ENTITÉ ANCIENNE PUISQU'ELLE A ÉTÉ CRÉÉE EN 1972. MAIS SON ACTION EST PLUS QUE JAMAIS D'ACTUALITÉ, TOUT SPÉCIALEMENT DANS LE CADRE DE L'AMÉNAGEMENT DE LA VILLE DE DEMAIN. D'AUTANT QU'ELLE SE FAIT FORT D'ATTIRER LES JEUNES DANS LA FILIÈRE DES TRAVAUX SOUTERRAINS. **YANN LEBLAIS, PRÉSIDENT DE L'AFTES, NOUS EXPLIQUE COMMENT ELLE EST EN PASSE D'Y PARVENIR.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



YANN LEBLAIS

Président de l'AFTES.

Directeur Global Infrastructure du Groupe Arcadis.

Vice-Président de l'AITES, 2007-2010. Président de la Fédération française de l'Ingénierie (Syntec-Ingénierie, 2001-2005). Président de la Fédération Européenne de l'Ingénierie (EFCA, 2005-2008).

L'AFTES, autrefois Association Française des Travaux en Souterrain, est devenue en 2005 l'Association Française des Tunneliers et de l'Espace Souterrain. Quelles ont été les raisons de ce changement de dénomination ?

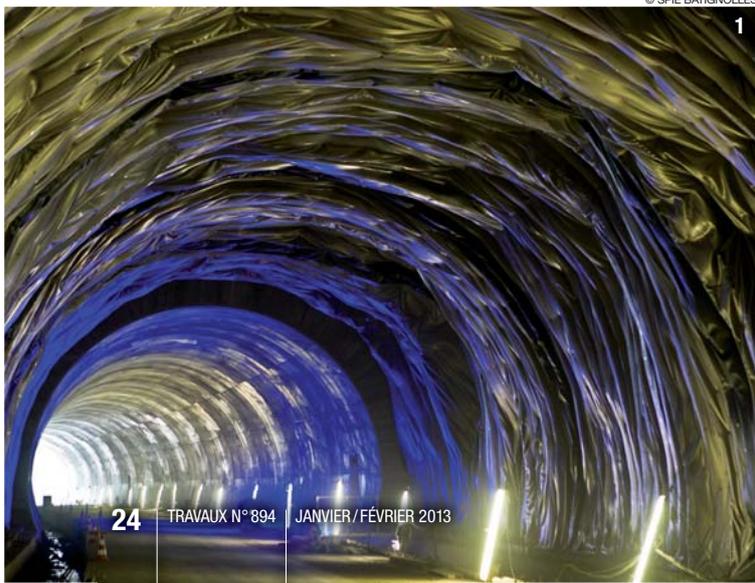
L'AFTES a une particularité historique : celle de regrouper l'ensemble des intervenants à l'acte de construire des ouvrages sous le niveau du sol : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et ingénieries, architectes, entreprises, acteurs institutionnels, tel le CETU⁽¹⁾, et universités.

Ce point est très important : l'AFTES est ainsi un forum d'échanges sans exclusive et une plate-forme qui intègre et restitue les avis de tous. Elle a changé d'appellation pour marquer une évolution forte : pour schématiser, nous avons considéré qu'il ne suffit pas d'améliorer et de promouvoir les techniques de

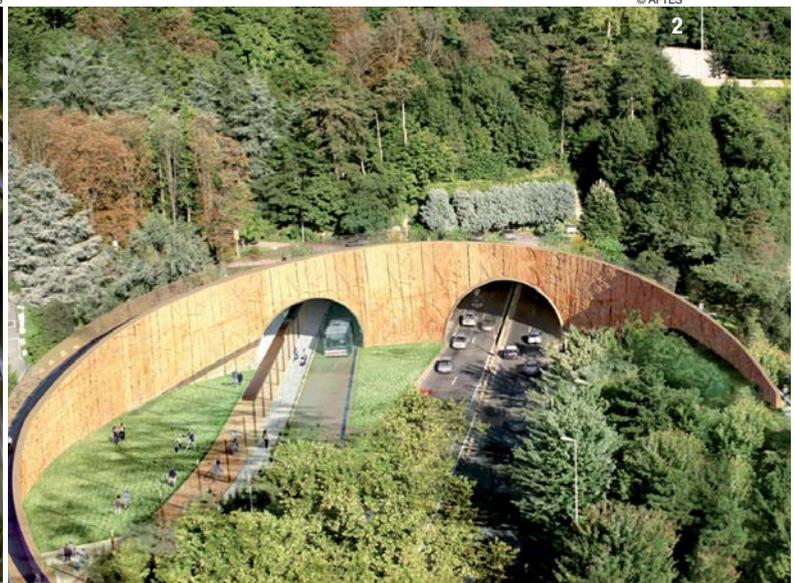
réalisation et les modalités contractuelles des travaux en souterrain mais qu'il convenait aussi d'être en mesure de sensibiliser puis de convaincre les décideurs et l'opinion publique d'utiliser cette richesse que constitue le sous-sol, en particulier en site urbain. Développer les espaces en souterrain est un moyen puissant pour maîtriser le développement urbain et mieux répondre à la densification de la ville et redéployer des espaces en surface. C'est aussi un mode de construction durable, en particulier sous l'angle de l'efficacité énergétique du fait de la grande inertie thermique du sous-sol.

Je suis optimiste sur l'évolution des mentalités, poussée par des besoins croissants. Même si en France le qualificatif souterrain est plutôt associé aux ouvrages de transport - métro, route, voie ferrée -, de nombreuses réalisations prestigieuses sont des espaces souterrains qui ne s'affichent

© SPIE BATIGNOLLES



© AFTES



pas comme tels : pour s'en tenir à notre capitale, la Bibliothèque François Mitterrand, le Musée du Louvre, les rénovations de la gare de l'Est et de la gare Saint Lazare ou la reconfiguration en cours des Halles en sont des exemples réjouissants ; on peut aussi citer la reconquête de l'espace urbain marseillais grâce à l'entertainment de l'Axe Littoral. Au-delà, l'espace souterrain c'est aussi des installations et des stockages industriels, des surfaces commerciales, un moyen de transporter les produits sur le « dernier kilomètre » ou encore les déchets par réseau pneumatique. Bref, les exemples convaincants abondent !

Quels sont, dans cette optique d'élargissement du champ d'action de l'AFTES, les grands sujets du moment et comment sont-ils traités ?

Dans notre association, le comité technique et le comité espace souterrain sont les deux piliers pour la constitution et la diffusion de la doctrine avec pour objectif la promotion de nos savoirs et de nos métiers. Le comité technique, le plus ancien, qui regroupe environ 300 membres pour 20 groupes de travail actifs, est chargé de faire progresser la connaissance dans les divers domaines des travaux souterrains. Le comité espace souterrain, plus récent, a pour vocation de promouvoir une utilisation intelligente de l'espace souterrain, notamment en site urbain. Il présente ainsi la particularité de regrouper aussi des acteurs qui sont des aménageurs - urbanistes et architectes, notamment - qu'il aide pour fournir à leurs interlocuteurs, notamment aux maîtres d'ouvrage,

L'AFTES EN BREF

Forte d'environ 800 membres, collectifs et individuels, L'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES), créée en 1972, a pour objet de rassembler et mobiliser tous les acteurs de la profession, investisseurs, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et ingénieries, bureaux d'études et de contrôle, centres de recherche et de formation, entrepreneurs, consultants, architectes, urbanistes, équipementiers, enseignants, etc. dans le but de :

- **Faire progresser la connaissance dans ses domaines de compétence,**
- **Échanger entre ses membres et diffuser le plus largement possible les recommandations de ses groupes de travail et plus généralement toutes les informations techniques, contractuelles, sociales, environnementales etc. dont elle dispose,**
- **Promouvoir l'Espace Souterrain et soutenir toutes les actions qui contribuent à le faire connaître,**
- **Aider au développement et à la diffusion du savoir-faire de l'ingénierie, des entreprises et des constructeurs français,**
- **Entretenir l'apport technique et la production de doctrine,**
- **Accroître l'intérêt des jeunes ingénieurs et techniciens du BTP pour les métiers du souterrain.**

L'AFTES est une organisation nationale adhérente à l'AITES (Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain).

- 1- Tunnel de La Bussière et de Chalosset sur l'A89 Est (Spie batignolles TPCE/Razel).**
- 2- Entrée du tunnel de la Croix Rousse.**
- 3- Le nouvel aménagement de la gare Saint-Lazare.**
- 4- Déplacement du site de captage des eaux de la Mer de Glace (Spie batignolles TPCI/Sotrabas).**

des arguments, des références et des idées en faveur d'un usage accru du sous-sol, en particulier dans l'optique du développement durable.

Ce comité a été l'incubateur d'une réflexion pour structurer cet apport de doctrines et de pensées qui débouche actuellement sur la mise en place d'un projet national baptisé « Ville10D ».

Ce projet a pour but de contribuer à l'élaboration et la concrétisation de réflexions sur l'utilisation de l'espace souterrain, en traitant en particulier ses aspects sociaux et réglementaires mais aussi son acceptation par le grand public.

Après du grand public mais aussi et surtout des élus, les travaux souterrains soulèvent régulièrement des polémiques, le plus souvent sans fondement d'ailleurs, mais qui ternissent leur image. Comment contribuez-vous à enrayer ce phénomène ?

Les travaux souterrains sont souvent associés par les élus à des dépassements de budget mais, heureusement, très rarement à des accidents de construction, ce qui témoigne de la maîtrise de ces techniques complexes par tous les acteurs impliqués. Les accidents opérationnels survenus dans les tunnels routiers alpins ont donné lieu à une remise à plat de la doctrine d'exploitation puis à des travaux de mise à niveau des ouvrages.

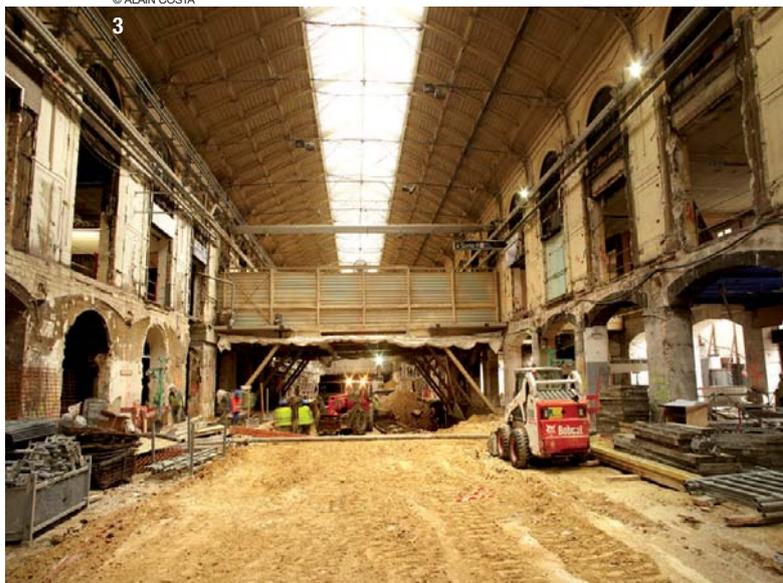
Si des dérives de budget existent encore, la maîtrise des coûts et délais s'améliore grandement grâce au professionnalisme de toute la chaîne des acteurs.

En outre, on tend vers une plus grande transparence : les budgets minorés par le maître d'ouvrage pour faire voter son projet ou les économies réalisées sur les études et reconnaissances qui conduisent à des surprises en phase de construction tendent à disparaître. L'AFTES a contribué à sa place à ces évolutions heureuses en faisant réfléchir tous ses interlocuteurs à la façon dont les risques sont identifiés et dont il convient de les partager et de les gérer.

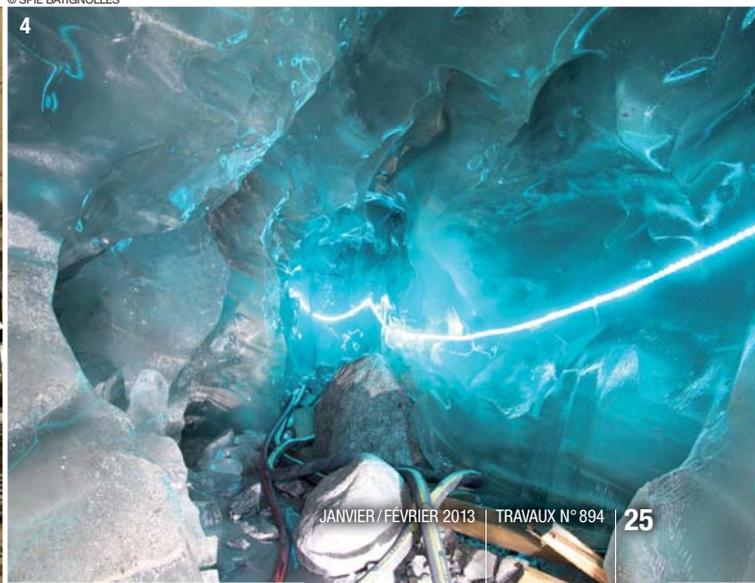
Cela inclut évidemment le risque du sol si important en travaux souterrains.

La gestion du partage des risques est un sujet clé pour l'AFTES. ▷

© ALAIN COSTA



© SPIE BATIGNOLLES



Vous évoquiez précédemment l'importance de l'action du comité technique.

Comment ses compétences se manifestent-elles ?

La doctrine technique est un actif majeur de l'AFTES depuis sa création, reconnu en France et à l'étranger. Le comité technique couvre l'ensemble des sujets liés aux travaux souterrains neufs ou de réhabilitation : reconnaissance géologique et géotechnique, conception des soutènements et des revêtements, maîtrise des tassements, méthodes de creusement, étanchéité, peinture, protection incendie, équipements, chaussées, bref toute la gamme d'interventions techniques qui couvre la vie d'un ouvrage.

Ce comité émet des recommandations, deux à trois par an, qui sont d'abord publiées dans notre revue, puis mises à disposition gratuitement sur notre site Internet en français et en anglais. Leur qualité est reconnue et nous en sommes fiers !

Le coût de ces traductions est élevé mais est nécessaire à la diffusion du savoir-faire français. C'est un plein succès et nous notons des centaines de téléchargements, d'origines diverses à travers le monde.

La diffusion de notre doctrine, au sens d'une culture technique française, en liaison avec l'AITES[®], est certainement une réussite de l'AFTES.

L'AFTES organise depuis déjà longtemps un congrès qui rassemble de nombreux participants.

Quelle est son utilité ?

Le congrès se tient sur trois jours, tous les trois ans. Le prochain sera organisé en octobre 2014 à Lyon. Il constitue un événement tout à



© AFTES

fait significatif ; en 2011, il a drainé plus de 1 200 personnes, avec des communications de qualité - 25% issues de l'international - et une exposition très importante avec plus de 200 exposants.

Le congrès est un outil de positionnement et de communication technique pour l'AFTES mais c'est surtout une plate-forme de développement des activités économiques entre les acteurs de la filière. Il contribue également à assurer les ressources de l'association.

5- Chantier Climespace à Paris.

6- Un robot de forage à deux bras sur un chantier à Monaco.

7- Le tunnelier Charlotte pour le chantier du tunnel de Saverne (Spie Batignolles TPC/Dodin Campenon Bernard).

En dépit de l'attrait indéniable qu'il présente, le secteur des Travaux Publics en général, et des travaux souterrains en particulier, connaît des problèmes de recrutement.

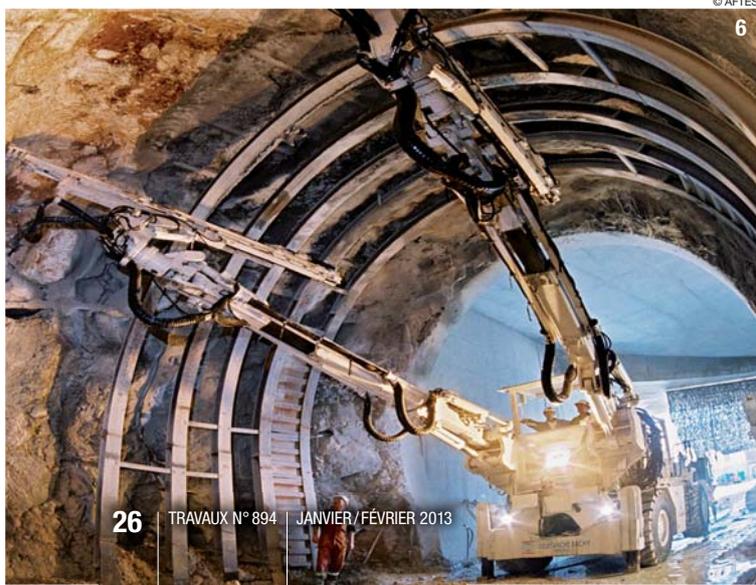
Comment l'AFTES contribue-t-elle à inverser cette tendance ?

Nous avons créé à ce sujet en 2010 un comité éducation en vue d'intéresser et d'attirer les jeunes vers les métiers du souterrain et de favoriser la formation professionnelle de ses membres, en assurant un lien permanent avec les milieux universitaires. Son action majeure a été la création en 2011 d'une formation supérieure francophone pour délivrer un savoir approfondi dans le domaine des travaux souterrains.

L'AFTES a mis en place à Lyon un mastère complet, de niveau bac+6, reconnu par l'université, sous l'égide de l'INSA de Lyon et de l'ENTPE et dont le programme a été développé au sein de l'association par le comité « éducation » dirigé par Richard Kastner, ancien professeur de l'INSA de Lyon. Les professeurs français et étrangers sont tous des praticiens des travaux souterrains et pour beaucoup des membres actifs de l'AFTES.

Ce programme de cours se déroule sur 10 mois avec une partie théorique de 5 mois et une partie application de 5 mois sous forme de stage rémunéré. Nous accueillons cette année, pour son deuxième exercice, 13 étudiants français et internationaux.

L'un des points très positifs de cette action est que sa réputation a franchi rapidement les frontières de notre pays et qu'elle s'est placée d'emblée en concurrente des quelques formations similaires en Suisse, Italie ou Asie. En effet, les programmes



© AFTES

6



© JEAN-MARC BANNWARTH

7

et l'élaboration des réponses à ces programmes répondent tout à fait aux besoins de connaissances pointues que peuvent avoir les jeunes qui se destinent à la filière des travaux souterrains. Nous avons donc décidé de lancer une deuxième promotion dans la continuité.

Ce mastère contribue également au rayonnement français. La France qui abrite de nombreuses et brillantes entreprises a le défaut de ne pas travailler assez collectivement, ce qui constitue parfois un handicap pour la capture des marchés à l'international. À long terme, les étudiants, en particulier étrangers, titulaires de ce mastère représenteront aussi un acquis pour les valeurs techniques françaises.

Je profite de cette tribune pour appeler les entreprises de travaux à être encore plus visibles dans le mastère, et à y envoyer aussi des jeunes ayant déjà acquis une expérience professionnelle en leur sein.

L'ensemble de ces actions a-t-il déjà eu des effets sur l'attrait que la filière des travaux souterrains peut exercer à leur profit ?

Au-delà de leur appétence technique, les jeunes sont attirés par des secteurs dans lesquels il y a un avenir économique. Le degré d'intérêt des jeunes et de leurs employeurs potentiels pour les travaux souterrains dépend d'abord de l'état du marché en France et du niveau d'activité des entreprises dans le domaine des travaux souterrains. En France le marché actuel est relativement modeste mais avec de grandes perspectives qui donnent actuellement de l'ouvrage surtout aux acteurs de

VILLE 10D EN BREF

Ville 10D, projet national de recherche, ce sont :

Différentes Dimensions pour un Développement urbain Durable et Désirable Décliné Dans une Dynamique « Dessus / Dessous ».

Le projet Ville 10D - Ville d'idées a pour objectif d'utiliser l'espace souterrain pour un développement urbain durable.

Ses grandes lignes sont les suivantes :

Les grands enjeux climatiques, énergétiques, écologiques vont bientôt conduire à des révisions de l'organisation et de la physiologie de la ville afin d'aller vers un modèle de ville durable. Dans cette mutation du mode de vie urbain, en une ou deux générations, aucune solution ne peut être négligée.

C'est l'occasion de valoriser une ressource peu utilisée et très méconnue : le sous-sol et plus généralement l'espace souterrain.

S'il peut contribuer à rendre la ville durable, il s'agit alors de réfléchir aux conditions et aux modalités urbanistiques qui permettront une meilleure prise en compte de cet espace par les concepteurs, aménageurs et gestionnaires de la ville.

l'ingénierie, comme le Grand Paris et le prolongement d'EOLE, le Lyon-Turin, la ligne n°2 du métro de Rennes ou les stockages de l'Andra.

Mais il est important de rappeler qu'à l'échelle du monde ce marché est absolument gigantesque puisque lié

au développement urbain - transports, eaux, énergie - avec tout ce que cela sous-tend : métro, adductions d'eau, égouts, transferts d'énergies...

L'un des objectifs que je m'étais donné il y a un an, lorsque j'ai été élu président, était d'attirer des jeunes au sein du comité technique, au sein du comité espace souterrain, et peut-être demain dans nos instances institutionnelles. Il semblerait que cette action commence à porter ses fruits et que les entreprises soient plus disposées à laisser les jeunes rejoindre les rangs de l'AFTES, sans doute parce qu'il y a un marché à venir. N'oublions pas aussi le puissant attrait qu'est le côté magique du creusement d'un souterrain : s'attaquer à la troisième dimension dans les entrailles de la terre, c'est quelque chose !

8- Chantier du tunnel bi-tube de Saverne (Spie Batignolles TPCI/Dodin Camponon Bernard).

9- La « sortie » au front d'un tunnelier constitue toujours, dans les travaux souterrains, un grand moment d'émotion.

Au-delà de ce mastère, l'AFTES a-t-elle des actions internationales ?

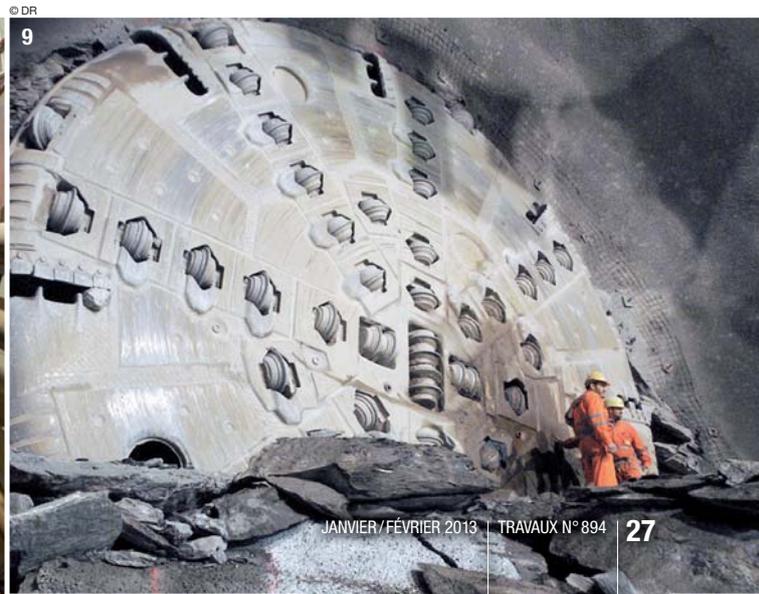
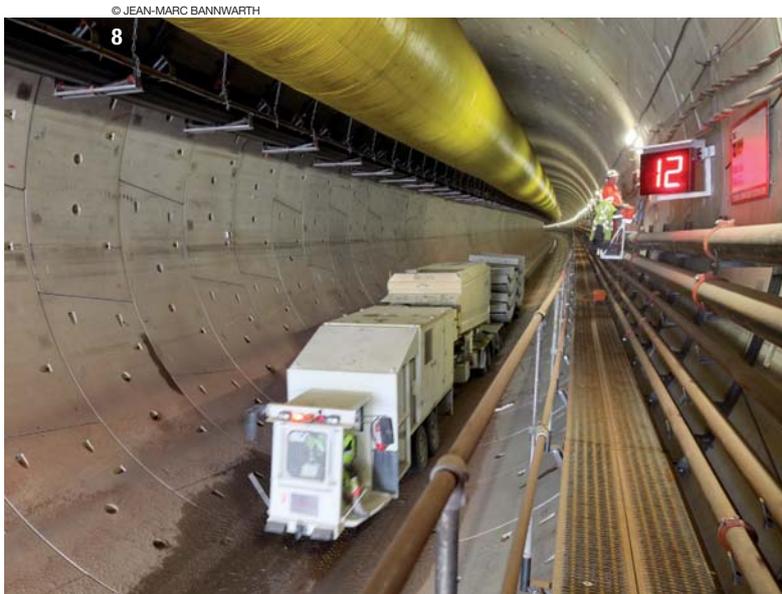
L'AFTES est un membre fondateur de l'AITES et y est active. Elle présentera bientôt sa candidature à l'organisation du Congrès international de 2017, à Paris. Récemment, l'AFTES a apporté son soutien à la création d'une association équivalente pour l'Azerbaïdjan et l'a aidé pour organiser son premier congrès qui s'est tenu en septembre dernier. Cette action a permis un positionnement fort de la marque France et a aussi constitué une plateforme de développement pour les entreprises de travaux et les ingénieries qui y ont participé et ont eu l'opportunité de rencontrer des clients potentiels et de nouer des discussions avec les autorités du futur métro de Bakou qui déboucheront peut-être sur des contrats. L'AFTES peut donc être un catalyseur au développement des affaires, appuyée par une présence effective des grandes entreprises françaises.

Le thème du projet congrès de Lyon 2014 est-il déjà arrêté ?

Le thème du prochain congrès sera « Risques et Opportunités ». « Risques » parce qu'on ne peut nier que creuser en souterrain nécessite une approche particulière pour anticiper et maîtriser un milieu toujours imparfaitement connu et « Opportunités » parce qu'il est possible de réaliser en souterrain énormément de travaux d'intérêt collectif ou privé entrant complètement dans la démarche de développement durable et créateurs de valeur. □

1- **CETU** : Centre d'Études des Tunnels.

2- **AITES** : Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain.





1- Des V65 et V4500 sur le chantier du nouveau port de Doha au Qatar.

MONTABERT QUALITÉ « MADE IN FRANCE » POUR LE MONDE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

MONTABERT EST RECONNU COMME UN LEADER DANS LE DOMAINE DES BRISE-ROCHE ET DES PERFORATEURS HYDRAULIQUES. PRÈS DE 100 ANS APRÈS SA CRÉATION EN 1921, LA MARQUE EST SOLIDEMENT ET DURABLEMENT IMPLANTÉE DANS LA RÉGION LYONNAISE. ELLE MAINTIEN CETTE POSITION GRÂCE UNE POLITIQUE INNOVANTE DE RECHERCHE ET DE FABRICATION QUI ASSURE UN NIVEAU DE QUALITÉ TRÈS ÉLEVÉ, QUASIMENT SANS ÉQUIVALENT. LES PRODUITS QUI SORTENT DE SON USINE DE SAINT-PRIEST, PRÈS DE LYON, SONT EXPORTÉS À PLUS DE 85 %, DANS PLUS DE 110 PAYS. L'ENTREPRISE A MIS AU POINT LE PREMIER MARTEAU HYDRAULIQUE AU MONDE EN 1964. ELLE A CONSERVÉ INTACTE SES CAPACITÉS D'INNOVATION.

Montabert S.A. a été fondée à Lyon en 1921 par Joannès Montabert. Spécialisée à l'origine dans la fabrication d'outillage pneumatique, en 1935, à l'initiative de Suzanne Montabert, la société étend la fabrication de sa

propre gamme de produits et conclut un accord de fabrication sous licence des produits Sullivan. L'expansion se poursuit et Roger Montabert, alors directeur général, accélère la commercialisation de marteaux hydrauliques de nouvelle conception avec la

création d'un département « recherche et développement » en 1949.

Un département export est créé en 1961 et les premières filiales Montabert sont ouvertes dans toute l'Europe à partir de 1964, parallèlement au remplacement de l'air comprimé

par l'hydraulique dans sa production d'outillage.

En 1965, Montabert invente le premier brise-béton hydraulique au monde puis, en 1966, le premier perforateur hydraulique au monde, conçu pour travailler aussi bien en surface, dans



© MONTABERT

2

2- Les brise-roche Montabert sont conçus pour travailler aussi bien en surface, qu'en souterrain et même sous l'eau : ici, sur le port Pierre Canto à Cannes.

3 - Le premier Pantofore Montabert pour travaux souterrains.

4- Maurice Stanich, président - directeur général de Montabert.



© MONTABERT

3

À partir de 1987, sa notoriété se développe encore avec le lancement des premiers Robofore, robots de forage en souterrain, légendaires s'il en est, et celui de la première gamme au monde de brise-roche hydrauliques à frappe variable. Ces BRV resteront plusieurs années sans équivalent sur le marché. En 1994, Montabert devient une entité du groupe Ingersoll-Rand. La société continue de jouir d'une excellente réputation sur le marché international et de son implantation à l'échelle mondiale, et bénéficie également des activités complémentaires d'Ingersoll-Rand.

L'introduction du brise-roche variable BRV65 en 1999 renforce encore le succès de la gamme BRV.

En 2002, Montabert obtient la certification ISO 9001, version 2000.

L'entreprise s'intéresse alors aux matériels compacts et conçoit la gamme Silver Clip pour porteurs de 0,7 à 14 tonnes (mini-chargeurs, mini-pelles et midi-pelles) en septembre 2004 ainsi qu'une nouvelle gamme d'accessoires de démolition en 2006.

Montabert commercialise le brise-roche V2500 pour les porteurs de 27 à 40 tonnes l'année suivante puis le brise-roche V1800 pour les porteurs de 25 à 40 tonnes en 2008.

Le fabricant lance également en 2008 le perforateur Micro CPA pour porteurs de 5 à 10 tonnes.

En 2007, à la suite de l'éclatement du groupe Ingersoll Rand, la société entre dans le groupe Doosan.

les mines à ciel ouvert et les carrières qu'en souterrain, pour la construction de tunnels et d'ouvrages enterrés.

L'un et l'autre sont commercialisés immédiatement à l'échelle mondiale car ils offrent un rendement sans comparaison avec celui des matériels pneumatiques disponibles sur le marché : quatre à cinq fois supérieur.

À cette époque, l'entreprise compte 200 employés à Saint-Priest.

En 1969, elle reçoit l'Oscar de l'exportation ainsi que le diplôme Prestige de la France. En 1978, Montabert réalise déjà 70% de son chiffre d'affaires à l'exportation, ce qui lui vaut l'attribution du Lion d'Or de l'Exportation.



© MARC MONTAGNON

4



5

© MONTABERT



6a



6b

© MONTABERT

5- L'emblématique Pantofore 476 d+®tour+®.
6a & 6b- Deux des premiers Pantofore et Robofore Montabert, qui resteront longtemps sans équivalent sur le marché.

7- Le centre d'usinage 5 axes pour la réalisation de pièces complexes doté de 350 outils différents.

8- L'une des nouvelles machines de production de pièces inaugurée en 2012.

9- Trempe des outils en usine pour leur conférer une structure métallique particulière.

En 2010, Montabert écrit un nouveau chapitre de son histoire avec le lancement de brise-roches hydrauliques d'entrée de gamme baptisés « Blue Line » qui viennent compléter la gamme existante des marteaux hydrauliques de la société. Outre la gamme très diversifiée de produits de forage et de démolition qu'elle propose aux entreprises, l'une des particularités de Montabert est la volonté bien ancrée dans les gènes des hommes « verts » de maintenir en France une production industrielle de très haute qualité grâce à un outil régulièrement modernisé dans lequel elle vient d'ailleurs de réaliser des investissements très lourds.

5 M€ D'INVESTISSEMENTS EN 2011/2012

« L'objectif permanent de la marque, indique Maurice Stanich, p-dg de Montabert, est de réduire les coûts de production tout en maintenant le niveau très élevé, quasiment sans équivalent, de nos produits ». À cet effet, de lourds investissements viennent d'être réalisés dans le site de Saint-Priest : un centre d'usinage de 1,5 M€ en 2011 et quatre nouvelles machines de production de pièces d'un montant global de 3,5 M€ en 2012.

Ceux de 2011 comprenaient un centre d'usinage 5 axes pour la réalisation de pièces complexes. Doté de 350 outils

différents avec changement automatique géré par la machine, il augmente la productivité et la flexibilité de fabrication et contribue à mieux maîtriser la qualité d'usinage des pièces de grandes dimensions. À noter que sa programmation a été réalisée entièrement en interne par des techniciens de Montabert.

Les investissements 2012 concernent plusieurs équipements de l'usine :

→ Un tour en cellule intégrée pour l'usinage des corps de brise-roches : machine très flexible qui permet la réduction de la taille des lots et donc des en-cours ;

→ Un tour avec tête de fraisage inté-



7



8



9

© MONTABERT

grée pour l'usinage de pièces longues en une seule opération ;
 → Une rectifieuse pour les petites pièces pour usinages complexes ;
 → Une installation de traitement de surface pour améliorer la finition et la qualité, totalement intégrée dans le flux de fabrication.

Toutes les nouvelles machines ont l'avantage d'être moins bruyantes, moins polluantes, totalement carénées afin d'assurer un usinage en toute sécurité.

INVESTIR ET PRODUIRE EN FRANCE

Il est un autre sujet de satisfaction de Maurice Stanich : tout en étant l'une des parties intégrantes, et non des

10- Un brise-roche V4500 prêt pour l'expédition au départ de Saint-Priest.

11- Deux perforateurs CPA au travail dans le tunnel de la Croix-Rousse.

12a & 12b- Une application de brise-roche en creusement en pleine section en travaux souterrains.



TROIS FAMILLES DE BRISE-ROCHE

GAMME SILVER CLIP

9 modèles de 60 à 500 kg (pour porteur de 0,6 jusqu'à 12 tonnes) conçus en collaboration avec les leaders des excavateurs compacts (8 brevets techniques déposés).

Ces marteaux légers rencontrent un grand succès à l'international et sont notamment choisis par de nombreux loueurs et fabricants d'excavatrices. Ils sont utilisés principalement en milieu urbain où l'usage de petits engins s'impose pour des travaux de voirie, de petits terrassements et des démolitions.

GAMME MOYENNE ET LOURDE

9 modèles de 900 kg à 6 000 kg (pour porteur de 18 à 90 t).

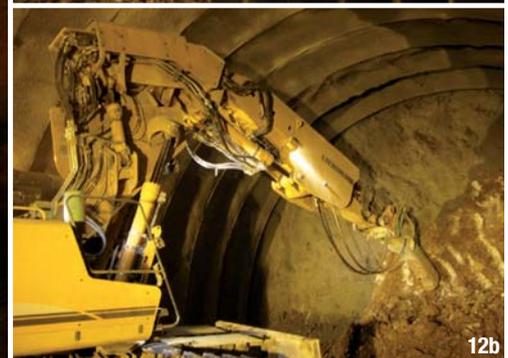
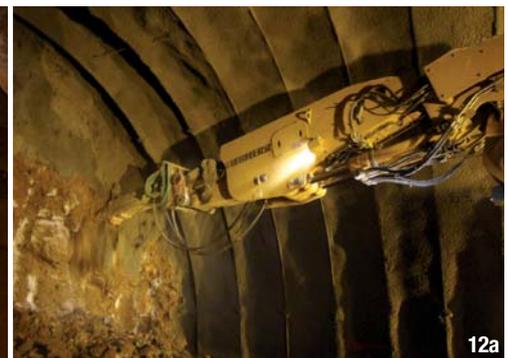
Les marteaux moyens et lourds Montabert se différencient par la qualité des matériaux utilisés (acier de type aéronautique), la précision de l'usinage et de finition des pièces ainsi que par des systèmes de fonctionnement et de régulation brevetés, qui permettent une production optimale, quel que soit le type de roche, tout en protégeant le porteur.

Ces brise-roches variables multi-vitesses permettent d'adapter, en continu, le rapport énergie/fréquence afin de casser la roche au mieux tout en préservant l'appareil de la frappe à vide. La puissance est automatiquement convertie en énergie par coup maximum en terrain dur ou en fréquence de coups maximum en terrain tendre ou fracturé.

moindres, du groupe Doosan, Montabert est demeuré un constructeur français qui investit en France pour concevoir, développer, fabriquer et commercialiser des marteaux français : « Doosan investit à Saint-Priest, martèle Maurice Stanich. Il faudrait que les rares constructeurs encore présents en France en fassent de même. En France, nous avons le savoir-faire en matière de mécanique. Il faut le préserver et même le développer et il faut que nos clients français et européens en aient bien conscience et ne cèdent pas trop facilement au chant souvent éphémère des sirènes. Il faut miser sur la qualité de la fabrication et du service plutôt que de s'en tenir au seul prix ».

La politique de l'entreprise lyonnaise ne veut ni nourrir les craintes de la globalisation ni répondre aux appels protectionnistes mais plutôt démontrer qu'au travers d'un modèle industriel adapté, une entreprise française qui fabrique des produits compétitifs est à même de prospérer.

« Chez Montabert, nous résistons à la désindustrialisation facile en investissant des sommes importantes dans notre outil de production, ajoute Maurice Stanich. Nous bravons la politique des bas coûts grâce à des produits très performants conçus et fabriqués par un personnel hautement qualifié. C'est d'ailleurs grâce aux 370 hommes et femmes qui s'impliquent au quotidien que nous proposons des brise-roches ▷





13



14

13- Un V4500 en abattage au front en carrière.

14- Un Montabert V65 sur porteur Caterpillar 374 : un couple parfait en carrière.

15- À Hong Kong, plusieurs V45 tunnel sur le chantier de la station de Shatin.

16- L'un des derniers nés de la gamme « Blue Line », le modèle XL1700 d'une force de frappe de 3400 J.

17- Le premier brise-roche hydraulique Montabert BRH 500.

toujours plus efficaces pour continuer à creuser l'écart. »

En complément de cette politique de développement de son pôle industriel, Montabert mène d'intenses opérations de qualification de son personnel.

Et notamment de son personnel hautement qualifié : c'est ainsi que, toujours dans l'idée d'un ancrage local fort, le service R&D (plus de 50 personnes - 4 % du chiffre d'affaires) augmente ses effectifs chaque année par l'embauche de jeunes ingénieurs issus de grandes écoles (Mines, INSA, Arts & Métiers...).

DES PERFORATEURS POUR LE MONDE

Les résultats de cet engagement se retrouvent au niveau des produits et, tout particulièrement, des perforateurs pour travaux souterrains et miniers.

Ces derniers sont achetés dans le monde entier par des fabricants de porteurs et non des moindres : en Chine, Corée, Canada, Japon, Pérou, Pologne, Suède... la liste est longue !

Ces perforateurs sont reconnus par tous les utilisateurs comme les meilleurs pour leurs performances et leur fiabilité,

résultat de plusieurs dizaines d'années d'expérience. Une parfaite connaissance des mécanismes de percussion et de transmission des ondes de choc a permis aux ingénieurs de Montabert d'être les premiers à développer de nouveaux concepts comme le refroidissement hydraulique et l'optimisation du transfert de l'énergie par coup. Ils peuvent recevoir différents outils de forage : perforateurs hydrauliques pour les machines de mines, tunnels et carrières, mâts de forage, commandes hydrauliques et électronique.

BRISE-ROCHE : TROIS FAMILLES DE PRODUITS

La gamme des brise-roche est organisée en trois grandes familles de produits : Silver Clip, gamme moyenne, gamme lourde.

Ils permettent d'obtenir un rendement élevé pour briser des blocs de roche, du béton, ou pour excaver, en utilisant les principes de l'hydraulique pour démultiplier la force de travail.

Ces brise-roche peuvent atteindre une productivité jusqu'à deux fois supérieure à celle d'outils d'autres marques



15



16



17



© MONTABERT

18

LES DATES-CLÉS

- 1921** : création par Joannès Montabert pour la fabrication d'équipements pneumatiques
- 1949** : Roger Montabert, directeur général, développe les ventes de brise-roche
- 1964** : remplacement de l'air comprimé par l'hydraulique
- 1965** : Montabert conçoit le 1^{er} brise-béton hydraulique au monde
- 1966** : premier perforateur hydraulique au monde
- 1969** : Montabert devient le 1^{er} constructeur mondial de brise-roche
- 1987** : lancement des Robofore et des premiers brise-roche hydrauliques au monde à frappe variable (BRV)
- 2002** : certification ISO 9001, version 2000
- 2004** : lancement des brise-roche Silver Clip pour mini-pelles
- 2007** : entrée dans le groupe Doosan
- 2008** : lancement du perforateur Micro CPA pour porteurs de 5 à 10 tonnes
- 2009** : lancement de la série Blue Line, simple et économique

car ils bénéficient d'exclusivités technologiques brevetées. La réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO₂ des porteurs atteint jusqu'à 50%.

BRISE-ROCHE ET TRAVAUX SOUTERRAINS

Il est une application moins connue des brise-roche bien que très importante, à côté des techniques de creusement et d'abattage par robot de forage petit ou

grand, tunnelier ou machine d'abattage ponctuel : c'est leur application pour les travaux en tunnel.

Montabert s'en est fait une spécialité du fait de la conception même de ses produits qui peuvent travailler, pour la plupart, aussi bien verticalement, ce qui constitue leur destination première, qu'horizontalement, où les contraintes engendrées sont complètement différentes. En travaux souterrains, un brise-roche peut être mis en œuvre pour de

nombreuses applications : purge autour de la voûte, accroissement de la section en voûte, voire creusement en pleine section, creusement du stross et du radier, creusement de refuges, reprofilage des piédroits...

Les BRV, en particulier, peuvent travailler dans toutes les positions même avec une faible poussée, par exemple pour une ouverture de tunnel en pleine section. Ils n'ont pas besoin d'un système d'arrêt automatique pour être protégés contre la frappe à vide car le procédé BRV réduit automatiquement l'énergie s'il y a une faible résistance sous l'outil, évitant ainsi tout dommage ou usure prématurée.

Ils constituent les meilleurs brise-roche au monde - et ceci de l'avis unanime des utilisateurs - en travail horizontal et vertical ascendant en pleine section.

DES CHANTIERS-PHARES À L'ÉTRANGER

Ainsi que nous l'indiquons plus haut, Montabert réalise 85% de son chiffre d'affaires à l'exportation.

Quelques uns, parmi de très nombreux autres, des chantiers en cours auxquels participent ses matériels - perforateurs et brise-roche - mettent en évidence la qualité de la prestation qu'elle est en mesure de fournir aux entreprises qui ont fait le choix de la marque.

En Grèce, trois V45 montés sur des pelles Liebherr 934 CT et 944CT (versions tunnel) participent au creusement du tunnel de Patras (70 m² de section). À Hong Kong, ce ne sont pas moins de 70 perforateurs HC109 et HC110 qui sont en service ainsi que 15 marteaux lourds du SC22 au V45, sur plusieurs chantiers d'envergure.

Par exemple, plusieurs perforateurs HC110 montés sur des porteurs AMV à 2 bras et Robodril à 3 bras assurent le creusement du tunnel ferroviaire de raccordement de Hong Kong au continent chinois.

Toujours à Hong Kong, plusieurs V45 sont utilisés pour construire la station de métro de raccordement « Shatin » dont un V45 tunnel monté sur une pelle Liebherr 944 mis en œuvre en abattage de masse.

Au Qatar, pour la construction du nouveau port de Doha, l'entreprise belge Artesen a choisi 10 brise-roche Montabert, 5 x V65 et 5 x V4500 montés sur des pelles Caterpillar, les deux modèles les plus lourds de la gamme, pour les terrassements des ouvrages dans la roche très dure qui constitue le sous-sol de cette zone désertique : 12 millions de m³ avant fin 2014 ! □

18- Le premier Robofore Montabert R451.

19- L'usine de Saint Priest, aux portes de Lyon, berceau emblématique de la marque.



19

SAINT-PIEST : TROIS CHIFFRES-CLÉS

CHIFFRE D'AFFAIRES PRÉVISIONNEL 2012 : 88 M€

RÉSULTAT PRÉVISIONNEL : 13 M€

EFFECTIFS : 370 personnes

FORMATION EN SOUTERRAIN : 40% du CA

BRISE-ROCHE : 60% du CA

1- Chantier complexe au cœur de la ville de Marseille (milieu urbain dense).

1- Complex construction site in the heart of the city of Marseille (dense urban environment).

© STUDIO DÉTAILLE

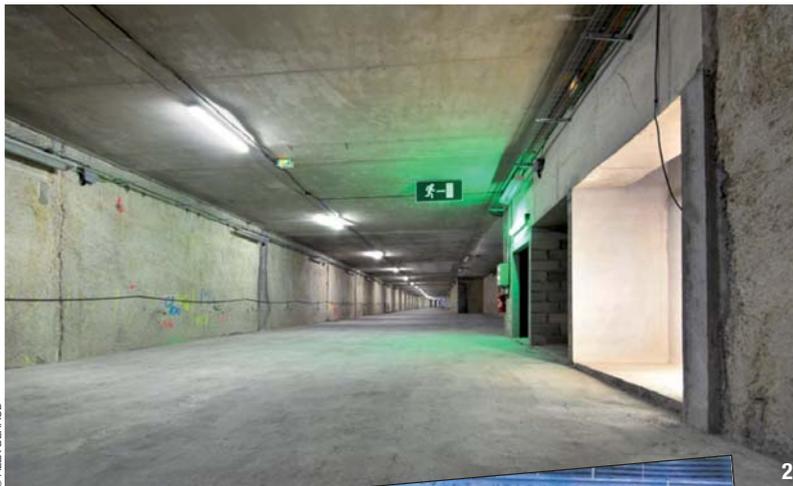
LE TUNNEL PRADO SUD À MARSEILLE

AUTEURS : VINCENT BONNEFOUS, DIRECTEUR DE PROJET, EIFFAGE TP - ANNE LAURE NIGON, DIRECTRICE TECHNIQUE, GTM SUD - DANIEL PRATS, INGÉNIEUR EN CHEF, SETEC TPI

LA CONCEPTION, LA CONSTRUCTION ET LES ÉQUIPEMENTS D'UN TUNNEL EN TRANCHÉE COUVERTE SUR PLUS DE 1 500 m DE LONG AU CŒUR DE LA VILLE DE MARSEILLE DANS UN MILIEU URBAIN DENSE, CONSTITUAIT UN DÉFI QUI A PU ÊTRE RÉALISÉ GRÂCE À UNE ÉQUIPE DE CONCEPTION INTÉGRÉE, DES MÉTHODES D'EXÉCUTION INNOVANTES ET BEAUCOUP DE COMMUNICATION.

2- Le tunnel Prado Sud.
3- Plan de situation de l'ouvrage.

2- The Prado Sud tunnel.
3- Location drawing of the structure.



© ALEX BÉRAUD

2



3

PRÉSENTATION

La Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole, dans le cadre de sa politique de réaménagement de l'espace urbain, met en œuvre un grand projet d'infrastructure qui s'étend entre le 8^e et le 10^e arrondissement de Marseille. (figure 3).

Le Tunnel Prado Sud permettra de désenclaver les quartiers sud de Marseille et de reconquérir les espaces publics, grâce notamment à la requalification du boulevard Rabatau et du Rond-Point du Prado, offrant ainsi une nouvelle qualité de vie aux riverains. Le projet d'une longueur de 1500 m est un ouvrage routier souterrain constitué d'un tunnel à deux niveaux avec deux sens de circulation séparés comportant deux voies de circulation par sens à gabarit réduit limité à une hauteur de 3,20 m, la hauteur libre sous plafond étant fixée à 3,60 m (figure 4). L'ouvrage est interdit aux véhicules de plus de 3,5 t et aux véhicules transportant des matières dangereuses.

L'ORGANISATION GÉNÉRALE DU PROJET

Au terme d'une procédure de consultation, La Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole a retenu comme concessionnaire la Société Prado Sud, groupement constitué des sociétés VINCI SA, VINCI concessions et EIFFAGE SA dont VINCI est le mandataire. La concession a été notifiée par Délégation de Service Publics le 14 mars 2008 pour une durée de 46 ans dont 60 mois pour la conception et la construction de l'ouvrage.

Pour l'exécution de l'ouvrage, la Société Prado Sud (Maitre d'Ouvrage) a conclu un contrat de conception-construction avec un groupement momentané d'entreprises constitué par les sociétés EIFFAGE TP (Mandataire), GTM Sud, Campenon Bernard Sud-Est, SALTERNE Marseille et EIFFAGE Energie. Le Groupement Concepteur Constructeur (GCC) a associé la mission de maîtrise d'œuvre pour la conception et le suivi des études et travaux dont, SETEC TPI pour le génie civil, SETEC ITS pour les équipements technique et EGIS pour les équipements de péage. Pour l'exploitation de l'ouvrage pendant la durée de la concession, un contrat est établi avec la société SMTPC (Société Marseillaise du Tunnel Prado Carénage).

LES ÉLÉMENTS TECHNIQUES ESSENTIELS DE L'OUVRAGE

Le tracé (figure 5) traverse le Parc du XXVI^e centenaire puis l'avenue Cantini. Il suit ensuite le Boulevard de Maillane, la Traverse de l'Antignane et le Boulevard Rabatau. L'ouvrage est réalisé en totalité en tranchée couverte à l'abri de soutènements de type parois moulées, lutéciennes ou palplanche.

La géométrie du Tunnel du Prado Sud est étudiée sur la base du RECTUR (Recommandations pour la Conception des Tunnels Urbains à Gabarit Réduit). Dans les rues les plus étroites ou comportant des contraintes de circulation fortes (Maillane, Antignane, Rabatau), la dalle supérieure est réalisée avant les principaux travaux de creusement (méthode dite du travail en taupe) afin de limiter les impacts sur les riverains (nuisances sonores, maintiens des accès, etc.).

LES RACCORDEMENTS

À la tête Nord, au niveau de l'échangeur SCOTT, le tunnel comprend deux bretelles d'entrée provenant de l'avenue Arthur Scott et du péage du tunnel Prado Carénage et deux bretelles de sortie dont une se raccorde au tunnel du Prado Carénage et l'autre à l'autoroute A50 et au chemin de l'Argile (figure 6). Ces bretelles s'insèrent dans le nœud routier existant comprenant l'accès au tunnel Rège.

Les péages souterrains (un dans chaque sens de circulation) situé au nord de l'ouvrage comportent des zones à ciel ouvert pour assurer un éclairage naturel au cinq voies de péage. Le système de péage est conçu de manière optimisée pour que les automobilistes ne s'arrêtent qu'une seule

fois quel que soit le trajet emprunté, y compris ceux provenant ou se dirigeant vers le Tunnel Prado Carénage.

À la tête Sud, au niveau du Rond-Point du Prado, le tunnel comprend une bretelle d'entrée et une bretelle de sortie depuis le boulevard Michelet ainsi qu'une bretelle d'entrée/sortie provenant de l'avenue du Prado (figure 7).

LES INSTALLATIONS ANNEXES

Le tunnel est conçu de manière à répondre aux exigences réglementaires en vigueur en matière de sécurité. En particulier, il est prévu des sorties de secours comprenant des niches de sécurité avec Poste d'Appel d'Urgence, colonne humide et colonne sèche tous les 200 m environ.

Ces issues de secours permettent une évacuation directe des automobilistes vers la surface, mais servent également d'accès aux services de secours.

Le système de ventilation-désenfumage du tunnel est du type longitudinal. Il comprend une station d'extraction massive (150 m³/s) située au croisement avec l'avenue du Rouet ainsi que 12 bossages équipés chacun de 2 accélérateurs.



4- Vue 3D de l'ouvrage.

5- Tracé de l'ouvrage.

4- 3D view of the structure.
5- Structure alignment.



En effet, les contraintes de hauteur de l'ouvrage ont conduit à positionner les accélérateurs latéralement.

LES PRINCIPALES ÉTAPES POUR LA MISE AU POINT DU PROJET

ÉTABLISSEMENT DES DOSSIERS ADMINISTRATIFS

Pour optimiser le délai de préparation, le Groupement Concepteur Constructeur a établi et coordonné la réalisation et le suivi des dossiers administratifs tel que le dossier d'enquête

6- Vue 3D échangeur Nord Scott.

7- Échangeur Sud Prado.

6- 3D view of the Nord Scott interchange.

7- Sud Prado interchange.

publique, la déclaration Loi sur l'Eau ou encore le dossier Préliminaire de Sécurité, pendant la phase de conception de l'ouvrage.

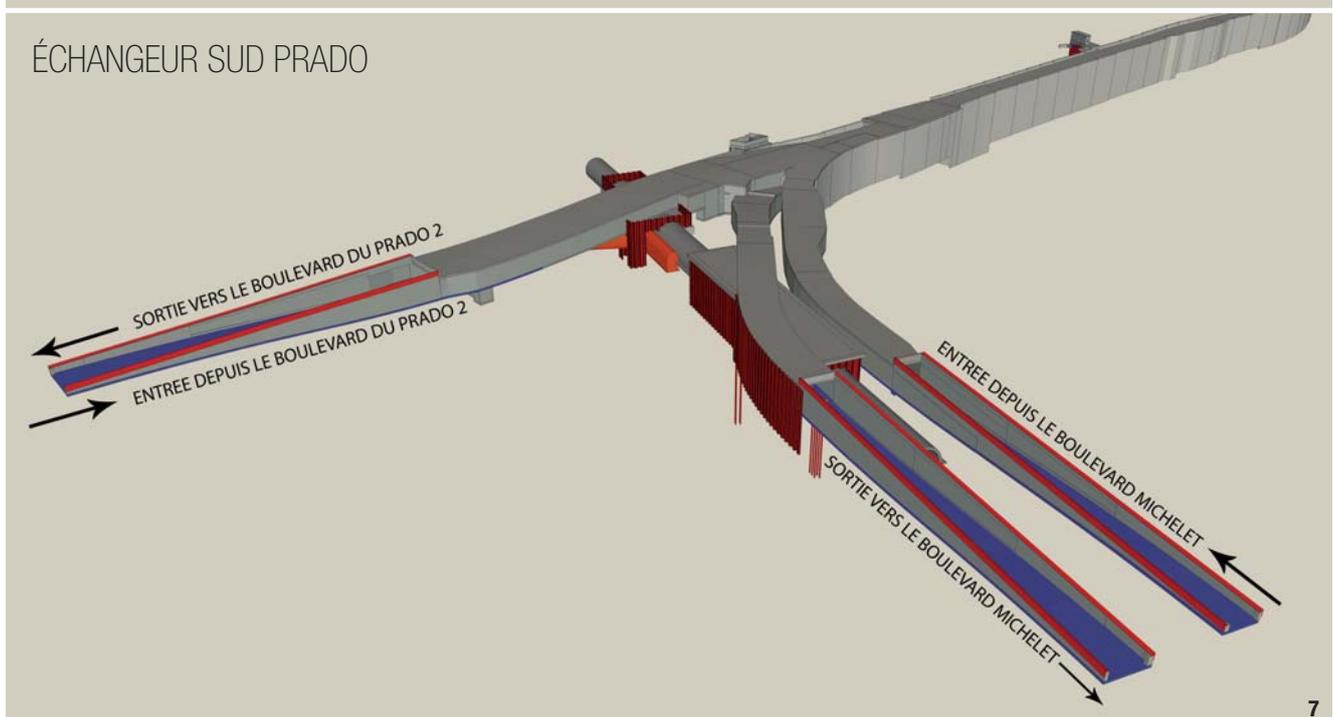
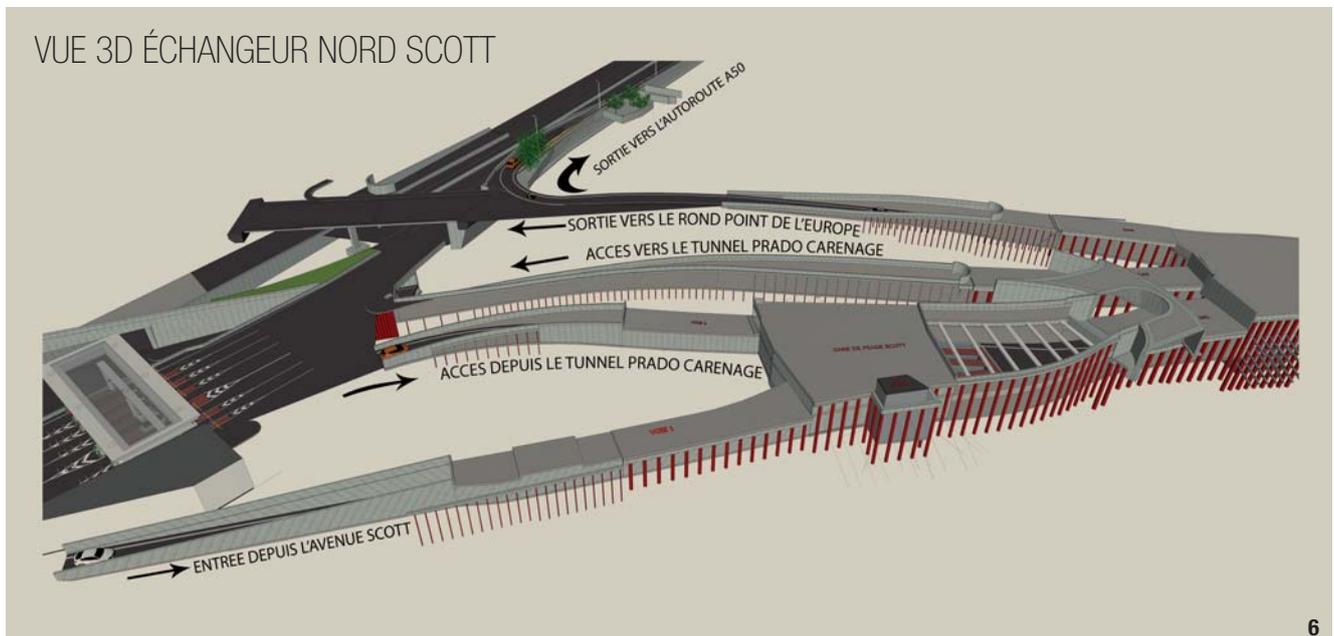
GÉOLOGIE

L'ouvrage projeté, construit dans l'agglomération de Marseille, est situé entre la plaine alluviale de l'Huveaune à son extrémité Sud au niveau du Rond-Point du Prado (à la cote 7 NGF) et la butte de Menpenti au niveau du carrefour Arthur Scott (à la cote 25 NGF). Les terrains superficiels hors Rond-

Point du Prado sont constitués de remblais et alluvions pouvant inclure des pôles argileux à limoneux et des pôles sableux à graveleux.

Les terrains superficiels de la zone du Rond-Point du Prado constitués de remblais et d'alluvions récentes à dominante argileuse et argilo-limoneuse aux faibles caractéristiques mécaniques.

La majeure partie de l'ouvrage est ancré dans le substratum constitué de marnes du Stampien, classés selon 4 groupes (terrains rocheux, marnes « raides », marnes argileuses, et sables). ▷



CONCEPTION DES SOUTÈNEMENTS

Pour s'adapter aux différents contextes rencontrés, (contraintes de site et diversité géologique) le projet fait appel à différentes techniques de soutènements. En section courante, il est retenu des parois moulées définitives d'épaisseur 60 cm (figure 8). Ces parois moulées permettent le soutènement des immeubles de grande hauteur bordant la tranchée.

Pour l'échangeur sud, l'ouvrage est construit à l'abri de soutènements provisoires en palplanches. Ces soutènements sont bien adaptés aux multiples phasages de travaux liés à la circulation routière du rond-point du Prado.

Dans l'échangeur nord, du fait des contraintes fortes liées à la circulation sur les bretelles du tunnel Prado-Carénage et du rond-point Scott, plusieurs types de soutènements sont retenus en fonction de la place disponible.

Des soutènements provisoires de type micro-berlinoise, doublé d'un béton projeté définitif ou plus majoritairement des soutènements de type Lutécienne composé de pieux en béton armé de diamètre 60 cm ou 80 cm.

Dans ces derniers cas, les pieux sont intégrés à la structure définitive après avoir été doublé en deuxième phase par un voile béton armée. Pendant les phases provisoires de terrassement les pieux sont maintenus par des tirants passifs.

ÉTUDES D'EXÉCUTION

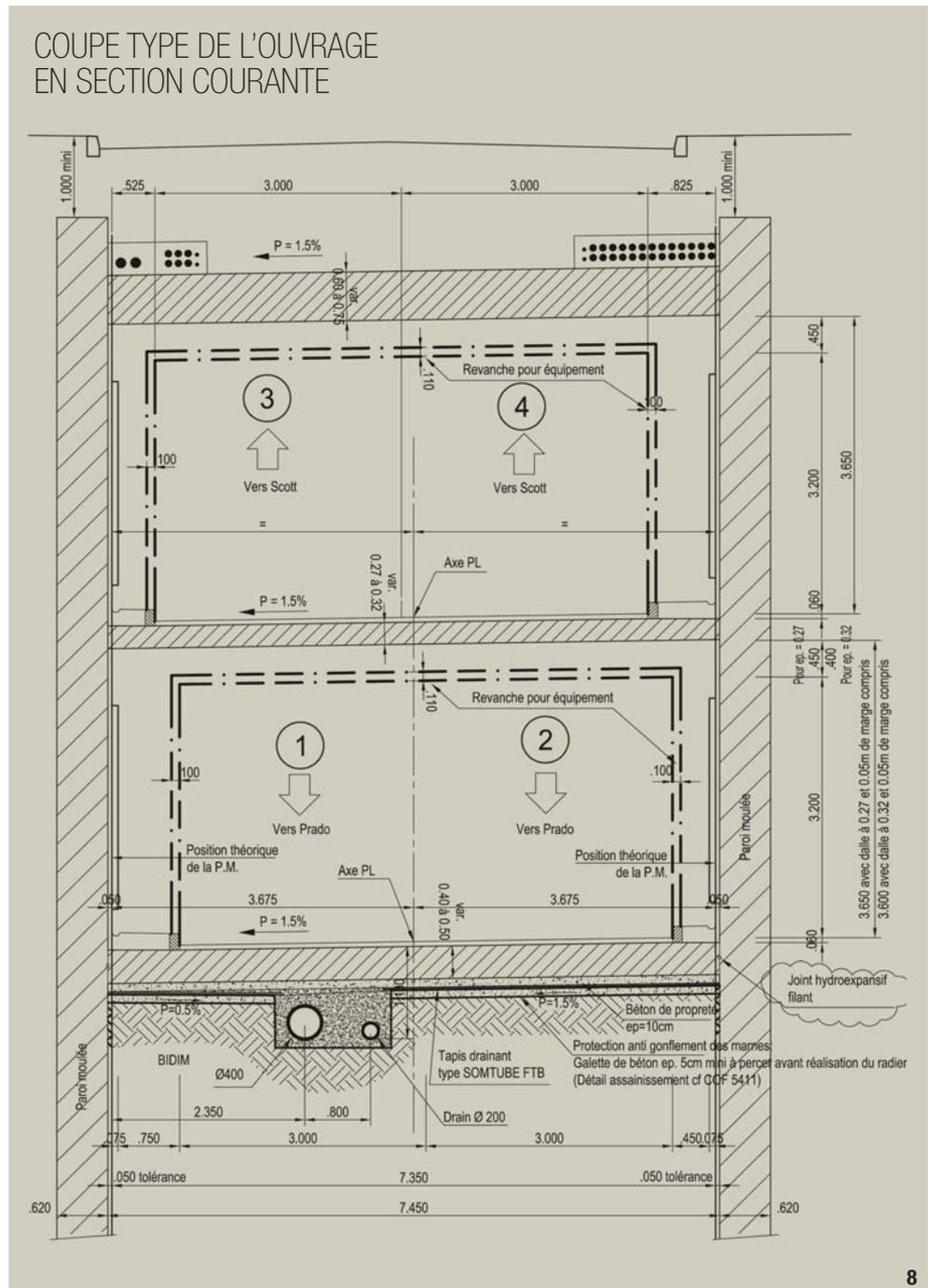
Le choix des bureaux d'études d'exécution structures a été mené très en amont, avant même la fin de la mise au point du dossier APD Génie Civil, dans la phase d'établissement des dossiers administratifs.

Les délais initiaux nécessitaient en effet une très forte réactivité sur le plan des études, en particulier sur les premières phases de travaux.

Point forts de l'organisation des études avec maîtrise d'œuvre intégrée :

La superposition des différentes phases d'études (avant projet, exécution) et des différents types d'études (génie civil, hydraulique, équipements) montre bien à quel point les différentes phases d'études se sont recoupées sur le projet TPS.

L'organisation retenue, avec maîtrise d'œuvre intégrée, a présenté pour le GCC des avantages en termes d'optimisation du projet, et de réactivité dans les phases de lancement et de validation des études.



Des missions complémentaires ciblées ont pu être confiées en phase de conception à la maîtrise d'œuvre. Elles ont permis de retenir des méthodes qui ont ensuite été intégrés comme données d'entrée dans les études d'exécution.

GESTION DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN

La Construction d'un tunnel d'une longueur de plus de 1500 m en milieu urbain, au cœur de la ville de Marseille

8- Coupe type de l'ouvrage en section courante.

8- Typical cross section of the structure in a standard section.

complexifie notablement les méthodes de réalisations pour tenir compte des contraintes fortes qui se situent à proximité du site telles que (figure 9) :

- Le stade Vélodrome (60 000 spectateurs) ;
- Le parc Chanot (parc d'exposition accueillant de nombreuses manifestations dont la foire internationale de Marseille et en 2012 le forum mondial de l'eau) ;
- L'Hôpital Saint Joseph ;
- La caserne des marins pompiers de

Louvain (une des plus importantes de la ville de Marseille) ;

→ Ainsi que de nombreux commerçants.

L'objectif du groupement a été d'assurer une gestion de l'environnement urbain en coordination avec l'ensemble des riverains, permettant de valoriser au mieux le chantier et développer

ainsi un sentiment d'adhésion autour des travaux.

Cette démarche volontaire a requis un fort investissement de la part du groupement pour être en permanence à l'écoute et informer les commerçants, riverains et institutions impactées directement ou indirectement par les travaux. L'engagement de la direction

de chantier assisté d'un interlocuteur dédié à la communication a permis de relayer largement les informations relatives au chantier via différents modes d'information, (site internet dédié, panneaux de communication, réunions avec les Comités d'Intérêts de Quartier, information radio et médias, journaux de chantier, etc.).

LES MÉTHODES DE RÉALISATION MISES EN ŒUVRE POUR LA SECTION COURANTE

PRINCIPE DE SOUTÈNEMENT

Située entre les accès nord (Échangeur Scott) et sud (Rond-point du Prado), cette section passe sous le boulevard Maillane, et le boulevard Rabatau. ▷

9- Chantier dans l'encombrement de la circulation.
10- Environnement (milieu urbain).
11- Coffrage dalle de couverture.

9- Construction site in congested traffic.

10- Environment (urban environment).
11- Cover slab formwork.

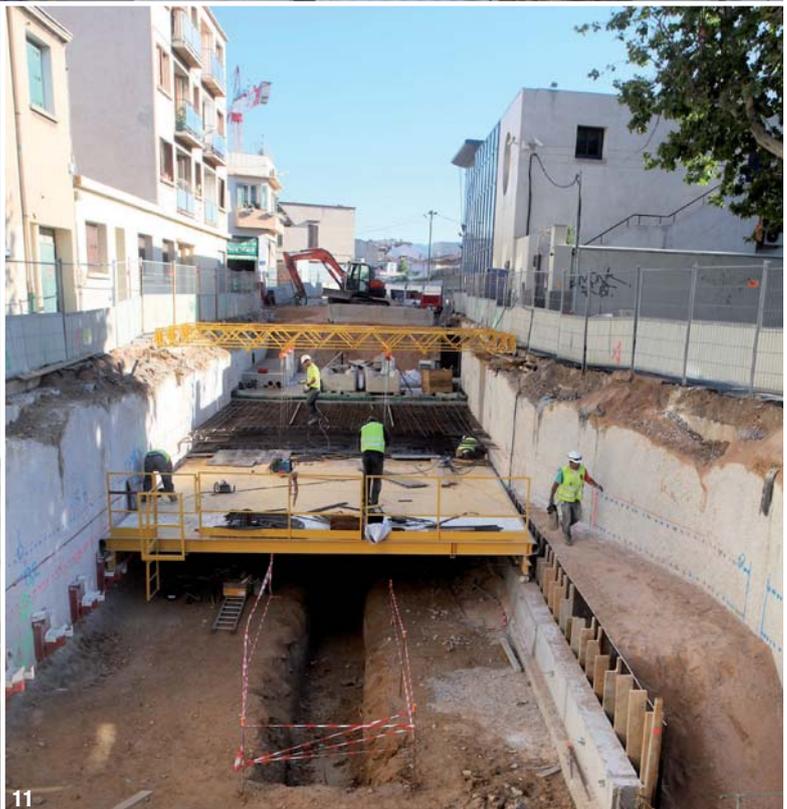


© ALEX BÉRAUD



10

© STUDIO DÉTAILLE



11

© STUDIO DÉTAILLE

Compte tenu de l'environnement urbain et de la nature du sol, il a été retenu comme technique de forage, l'utilisation de deux ateliers de type hydrofraise, le préforage étant effectué à la benne à câble (figures 1 et 10).

Les centrales d'alimentation des deux ateliers de parois sont implantées approximativement au milieu de deux zones de travail. Chaque atelier est relié à sa centrale par des canalisations implantés le long des rues et enterrées si nécessaire de façon à maintenir l'accès des piétons et des véhicules aux immeubles riverains.

RÉALISATION DE LA DALLE DE COUVERTURE

La dalle de couverture de la section courante est une dalle en béton armée de 60 cm d'épaisseur.

Selon la zone géographique elle se situe entre 1,50 et 2 m de profondeur, elle est ancrée sur les parois moulées par scellements d'armatures. Une étanchéité recouvre la dalle de couverture avec des relevés latéraux ancrés sur chacune des deux parois et protégé par un béton de protection de 10 cm.

Les contraintes importantes vis-à-vis de l'accessibilité des marins pompiers de Marseille et de la forte urbanisation, nous impose de limiter l'ouverture maximale du terrain en surface sur une longueur de 24 ml maximum.

Pour respecter ces contraintes et optimiser le cycle de réalisation, le groupement a conçu deux outils spécifiques et

d'une table coffrante permettant de réaliser des plots successifs d'une longueur de 6,60 m (figure 11).

Huit ateliers (terrassement, coffrage, ferrailage, bétonnage, étanchéité, protection étanchéité, multitubulaire et remblai) vont devoir se succéder sur cette longueur réduite avant le rétablissement de la circulation de surface. Les principales étapes de ce cycle sont :

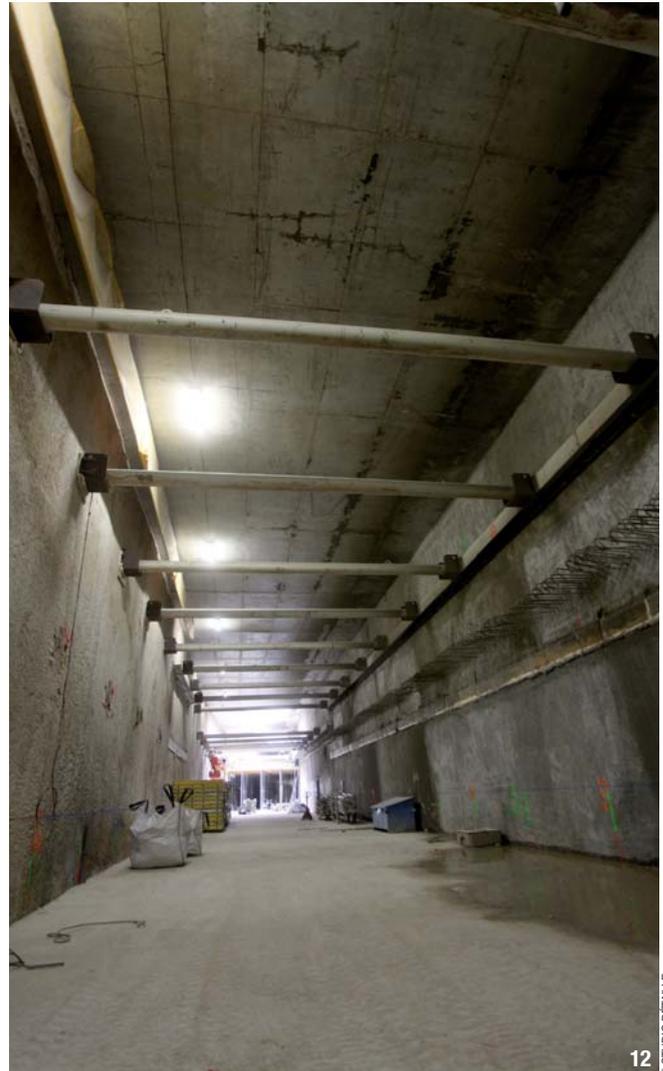
→ Terrassement de la première phase sous dalle de couverture : L'opération se fait à partir de la chaussée existante jusqu'à 1,30 m sous l'arase inférieure de la dalle de couverture. Le terrassement d'un stross sur une largeur d'environ 1,20 m et d'une profondeur de 0,90 m permet de circuler facilement

12- Pose buton intermédiaire après première phase de terrassement.

13- Phasage de principe - profil en long.

12- Placing intermediate stays after first earthworks phase.

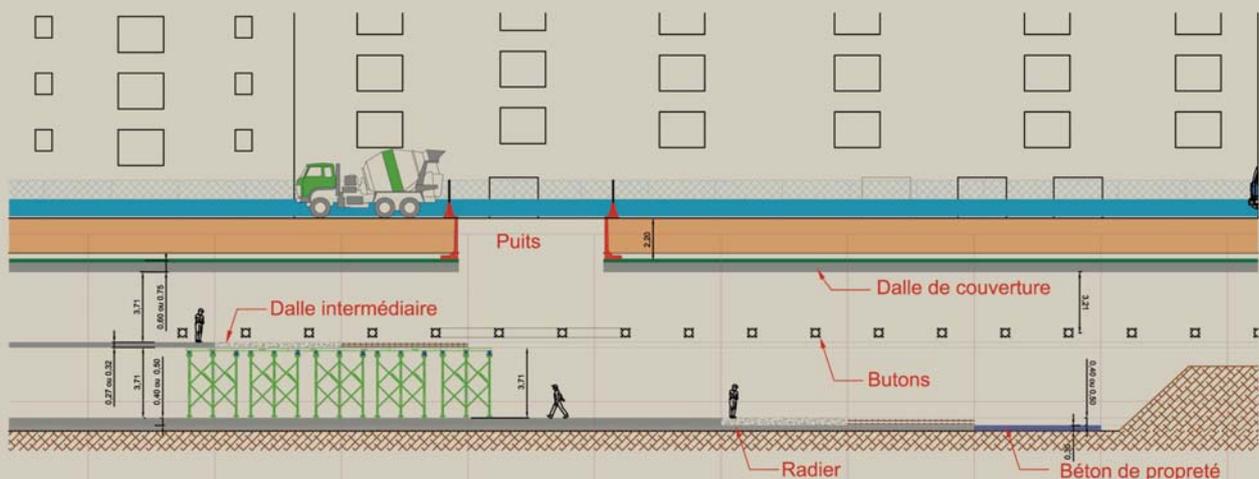
13- Schematic work sequencing - longitudinal profile.



12 © STUDIO DÉPALLE

PHASAGE DE PRINCIPE

Profil en long



13

à pied sous les tables de ferrailage et de coffrage.

→ Mise en place de la table : Après scellement des armatures de la dalle dans les parois moulées, la table coffrante est ripée sous les cages d'armatures préalablement positionnées. La table est prête pour un nouveau bétonnage.

TERRASSEMENT EN TAUPE ET POSE DES BUTONS

Après réalisation de la dalle de couverture, la suite du terrassement s'effectue en taupe. Selon la dureté du sol les matériaux sont extraits au trax ou au BRH, pour être ensuite transportés jusqu'aux trémies d'évacuation qui sont implantés tous les 200 m environ.

La première passe de terrassement sur une hauteur d'environ 4 m permet la pose d'un lit de buton positionné au-dessus de la future dalle intermédiaire (figure 12). La deuxième phase de terrassement est effectuée sous butons jusqu'à un mètre au dessus du fond de fouille. Dans les deux passes de terrassement la hauteur libre est d'au minimum 4 m, ce qui permet de travailler avec du matériel courant.

RÉALISATION DU RADIER

Le radier de la section courante est ancré dans le stampien marnéux qui est potentiellement gonflant et donc susceptible d'exercer une pression sous le radier. Il a donc été impératif d'adopter des méthodologies et dispositifs de construction empêchant l'hydratation de ces marnes potentiellement gonflantes tant durant la phase travaux que pendant la vie de l'ouvrage.

Le radier ancré sur les parois peut ensuite être réalisé par plot de longueur plus importante (figure 13).

DALLE INTERMÉDIAIRE

La dalle intermédiaire de la section courante est une dalle en béton armée C40/50 PM XS3 de 27 cm pour les portées courantes. Elle est coffrée à l'aide d'un coffrage de type TOPEC, système simple constitué d'étais et panneaux déplaçables à la main.

CONCLUSION

La principale difficulté de ce projet a été de réaliser un ouvrage en partie à ciel ouvert dans un milieu urbain très dense, comportant des contraintes extérieures fortes en termes de géométrie, de circulation, d'accessibilité des riverains et des secours.

Malgré ces contraintes, le chantier a pu se réaliser dans les délais prévus dès l'origine grâce à une bonne préparation et à l'anticipation d'une grande partie des problèmes rencontrés.

Cette préparation a pu se faire dans des conditions, grâce à l'intégration de l'encadrement de production dès la phase de conception du projet, que ce soit en génie civil ou en équipement.

Les contraintes décrites et les méthodes de réalisations qui en découlent ont pu ainsi être intégrées dès l'élaboration du projet et ainsi être prises en compte dans les études d'exécution.

La mise en place d'une cellule de synthèse pour s'assurer de la cohérence des plans d'équipement avec les plans de génie civil a limité les risques et permis une bonne intégration des équipements dans la structure. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

BÉTON : 35 000 m³

ARMATURES : 3 600 t

PAROIS MOULÉES : 25 000 m²

PAROIS LUTÉCIENNES : 10 500 m²

TERRASSEMENT : 165 000 m³ dont 45 000 m³ en taupe

ÉTANCHÉITÉ : 20 000 m²

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

LE DÉLÉGANT :

Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole

LE DÉLÉGATAIRE : CONCESSIONNAIRE ET MAITRE D'OUVRAGE :

Société Prado Sud

LE GROUPEMENT CONCEPTION CONSTRUCTION :

Génie civil : Eiffage TP (Mandataire) / Campenon Bernard Sud Est / GTM Sud

Équipement : Santerne / Eiffage Énergie Méditerranée

LA MAITRISE D'ŒUVRE :

Génie Civil : Setec TPI / Terrasol

Équipement : Setec ITS

Réseaux : Artélia

Péage : Egis

L'ARCHITECTURE :

Tunnel et émergences : Tangram

Parc du 26^e Centenaire : Ville et Architecture

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS PAR SPÉCIALITÉS :

Études des structures : VCF, BIEP, Ingerop

Géotechnique : Arcadis

Parois moulées : Botte Fondation / Spie Fondation

Fondation spéciales pieux, micro pieux tirant : Bottes Fondation / SEFI / Freyssinet

Armatures : CEPABA

Terrassement : Intertravaux / Forezienne

Chaussée provisoire et définitives : Eiffage Travaux Publics / Eurovia/ AER

Réseaux humides : Sogea / Eiffage TP Méditerranée / Queyras

ABSTRACT

PRADO SUD TUNNEL IN MARSEILLE

V. BONNEFOUS, EIFFAGE TP - A.-L. NIGON, GTM SUD - D. PRATS, SETEC TPI

The Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole authority, as part of its policy of renovation of urban space, is carrying out a major infrastructure project extending between the 8th and 10th arrondissements (districts) of Marseille. The Prado Sud Tunnel will improve access to the southern areas of Marseille and reclaim public spaces, in particular through renovation of boulevard Rabatau and the Rond-Point du Prado roundabout, thus offering a new quality of life to local residents. The project is an underground road structure 1500 metres long consisting of a tunnel on two levels with traffic in two separate directions, having two traffic lanes in each direction, a small gauge limited to a height of 3.20 m, with the clearance under ceiling being set at 3.60 m. The tunnel is prohibited to vehicles of more than 3.5 tonnes and vehicles carrying hazardous substances. □

EL TÚNEL PRADO SUD EN MARSELLA

V. BONNEFOUS, EIFFAGE TP - A.-L. NIGON, GTM SUD - D. PRATS, SETEC TPI

La Comunidad Urbana Marsella Provenza Metròpoli, en el marco de su política de reordenación del espacio urbano, realiza un gran proyecto de infraestructura que se extiende entre los distritos 8 y 10 de Marsella. El Túnel Prado Sud permitirá poner en comunicación los barrios del sur de Marsella y reconquistar los espacios públicos, gracias, en particular, a la recalificación del bulevar Rabatau y de la Rotonda del Prado, ofreciendo así una nueva calidad de vida a los vecinos. El proyecto es una estructura vial subterránea de 1.500 m de longitud constituida por un túnel de dos niveles con dos sentidos de circulación separados que incluyen dos carriles de circulación por sentido, con un gálibo reducido limitado a una altura de 3,20 m, dado que la altura libre bajo techo está fijada en 3,60 m. El acceso a la estructura está prohibido a los vehículos de más de 3,5 t y a los que transportan materias peligrosas. □



1
© DOMINIQUE FEINTRENE

COLLECTEUR VL9 LOT 2 DANS LE VAL-DE-MARNE : UN TUNNELIER SOUS LES VOIES SNCF

AUTEUR : PASCAL BARATÉ, DIRECTEUR DE PROJETS RAZEL-BEC

LE COLLECTEUR VL9 EST DESTINÉ À ACHEMINER GRAVITAIREMENT VERS L'USINE D'ÉPURATION DE VALENTON LES EFFLUENTS RÉSIDUAIRES DU SECTEUR UNITAIRE DU VAL-DE-MARNE, QUI ABOUTISSENT AUJOURD'HUI À L'USINE DE RELÈVEMENT DE CHARENTON. LE TRACÉ DE 3 200 m DU LOT 2 EST RÉALISÉ ENTIÈREMENT SOUS LA NAPPE PHRÉATIQUE AU MOYEN D'UN TUNNELIER À PRESSION DE TERRE ET SE SITUE MAJORITAIREMENT DANS LA ZONE D'INFLUENCE DES VOIES SNCF. LES TRAVAUX ONT FAIT L'OBJET D'UNE SURVEILLANCE TOPOGRAPHIQUE INFORMATISÉE, AVEC D'ÉVENTUELS DÉCLENCHEMENTS D'ALARME AUTOMATIQUE, AFIN DE CONTRÔLER QUE LES TASSEMENTS DEMEURERAIENT, EN PERMANENCE, EN DESSOUS DES SEUILS FIXÉS ET DE PRENDRE, SI NÉCESSAIRE, DES MESURES CORRECTRICES.

Le lot 2 (lire l'encadré) du collecteur VL9, réalisé pour le compte du SIAAP (Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne), constitue la partie centrale de l'ouvrage de 6 km qui, en 2014, viendra compléter le réseau d'assainissement francilien. Les travaux de 52 mois (dont 10,5 de préparation) comportaient le creusement d'une galerie de longueur 3 200 m (diamètre

intérieur 3 m) revêtue de voussoirs en béton armé. Durant ce délai, il devait également être réalisé un puits intermédiaire, nécessaire pour la phase d'exploitation, de 8 m de diamètre intérieur et 24 m de profondeur, terrassé à l'abri d'une paroi moulée préalablement réalisée, l'aménagement d'une chambre technique ainsi que le génie civil et les équipements (automatismes, vannes, trappes, portes étanches) de 4 puits.

1- Emprise réduite coincée entre les voies SNCF Paris-Lyon, la Marne et l'A4.

1- Small land area in between the Paris-Lyon railway tracks, the Marne River and the A4 motorway.

UN VOISINAGE SENSIBLE

Un tunnelier CSM Bessac à pression de terre, baptisé Anne, a assuré l'excavation (diamètre 3,72 m). La machine de 110 t, qui disposait d'une poussée totale de 1 200 t (avec une puissance sur la roue de coupe de 500 kW), a réalisé un avancement mensuel moyen de 170 m (y compris périodes de vacances). Principale difficulté : le tracé, implanté dans un environnement

urbain particulièrement dense, se situe à 80 % dans la zone d'influence⁽¹⁾ des voies SNCF de la ligne Paris/Lyon, la plus fréquentée du réseau hexagonal. Il les franchit en effet à deux reprises, avec une couverture voisine de 20 m, et les longe à une quinzaine de mètres de distance, sur environ deux kilomètres. Dans la pratique, le premier franchissement sous les voies SNCF, réalisé à l'automne 2010, survenait dès les premiers mètres d'excavation, donc en pleine phase d'apprentissage et de montage du train suiveur. Afin de demeurer en deçà des seuils de tassements fixés par la SNCF (4 mm pour le seuil de vigilance et 8 ou 10 mm selon la traversée pour le seuil d'alerte), il fallait, bien entendu, surveiller au plus près les paramètres d'avancement de la machine et de remplissage du vide annulaire (pression, volume) mais, surtout, garantir une continuité de travail sans interruption de creusement lors du passage des 2 traversées des voies SNCF. Pour ce faire, il fallait éviter les gros travaux d'installation du tunnelier (notamment sur le train suiveur), alors même que débutait cette phase de démarrage délicate et difficile.

UN NOUVEAU COLLECTEUR POUR LE SUD-EST PARISIEN

Destiné à renforcer le réseau d'assainissement du sud-est parisien, le collecteur VL9 est un ouvrage de 6 km de longueur totale dont le diamètre varie de 2,5 à 4 m. L'ouvrage, creusé à 20 m de profondeur, permettra de donner plus de souplesse de fonctionnement et d'acheminer plus rapidement, de manière gravitaire, les eaux usées entre la station de pompage de Charenton-le-Pont (94) et l'usine de traitement des eaux Seine-Amont à Valenton (94). Le premier tronçon (lot 1 de 1 200 m), réalisé entre juin 2009 et février 2010, démarre sur la commune de Charenton, au niveau de l'îlet Martinet (puits P0), traverse la Marne, longe la RN6 sur la commune de Maison-Alfort avant de s'arrêter à l'angle de la rue Amédée Chenal et de la RN6 (puits P1). Le deuxième tronçon démarre du puits P1 pour rejoindre le puits P3 sur le délaissé autoroutier de l'A86, le long de la RN6, sur la commune de Créteil. Le troisième et dernier tronçon (lot 3 de 1 600 m) démarre du puits P3, traverse Créteil pour rejoindre le puits P4 sur la commune de Valenton.

2- Futur collecteur de diamètre intérieur 3 mètres.

2- Future main drain of inner diameter 3 metres.

UN TRAIN SUIVEUR À « DIAMÈTRE VARIABLE »

En conséquence, le choix a donc été fait de monter, préalablement à la descente du tunnelier, l'intégralité des 70 m de long du train suiveur, à l'arrière du puits d'attaque, dans la galerie de 1 200 m creusée par le lot précédent, en évitant

ainsi d'avoir à descendre et assembler les éléments constitutifs au fur et à mesure des premiers mètres d'avancement. La galerie du lot précédent présentant un diamètre fini (2,50 m) inférieur à celui du tronçon à creuser il a donc fallu concevoir, dès les études, un train suiveur à géométrie variable, celui-ci étant capable d'évoluer d'une configuration de 2,50 m de diamètre, durant le démarrage, à 3,00 m lors du chantier proprement dit. Cette spécificité, demandée lors de la commande à notre fournisseur, a été obtenue en rajoutant des entretoises dans certaines parties des remorques, d'autres équipements, à l'instar du système de ventilation auxiliaire, n'ayant pas été installés dès le départ. La ventilation initiale s'effectuait à partir de celle du puits qui, ultérieurement, a été raccordée au dispositif du tunnelier. Grâce à cette méthodologie particulière et à l'ensemble des procédures de contrôle mis en œuvre, les tassements n'ont pas excédé 4,2 mm et 3 mm lors des deux franchissements. Dans la pratique, ces mesures étaient sous le contrôle de deux théodolites motorisés qui auscultaient en permanence les 253 cibles ▷





3

© DOMINIQUE FEINTRENE

de la 1^{re} traversée des voies SNCF (147 lors de la seconde traversée), implantées sur les traverses des rails et sur certains ouvrages singuliers, chaque point étant relevé toutes les 20 minutes. L'ensemble des données, remontées au système informatique, était ensuite traité en temps réel, des procédures d'alerte par SMS étant prévues en cas de dépassement des seuils.

UNE GÉOLOGIE CLASSIQUE MAIS ADVERSE

Les travaux, entièrement sous la nappe phréatique, s'inscrivent dans la géologie typique du sous-sol parisien : remblais, alluvions modernes, alluvions

anciennes, calcaire de Saint-Ouen, sables de Beauchamps, marnes & caillasses, calcaire grossier, fausses glaises, argiles plastiques. Sur le plan des difficultés rencontrées, il faut signaler la présence de deux thalwegs, situés au contact des horizons des sables de Beauchamps et du calcaire de Saint-Ouen, qui ont généré de fortes venues d'eau. Afin d'éviter tout entraînement de fines susceptible de produire un phénomène de fontis, qui peut s'avérer très problématique dans les sables de Beauchamps, des travaux complémentaires de confortement par injection du terrain ont été effectués à l'approche du puits P3.

3- Vue intérieure du puits d'accès « Puits Carnot ».

4- Équipe de maintenance du chantier.

5- Levage du tunnelier « Anne », octobre 2012.

3- Interior view of the «Puits Carnot» access shaft.

4- Construction site maintenance team.

5- Lifting TBM «Anne», October 2012.

UNE ÉVACUATION DES DÉBLAIS PAR BARGES

Sur le plan logistique, toutes les installations ont été positionnées autour du puits PO, les opérations d'approvisionnement du tunnelier et de marouflage des déblais s'effectuant donc en empruntant les 1 200 m de galerie de « connexion » du lot 1. Les déblais, transportés par wagons, étaient ensuite déversés dans une fosse « tampon », par l'intermédiaire d'une grue à tour. Ils étaient repris par une pelle chargeant un tapis convoyeur d'une trentaine de mètres afin d'être évacués par voie fluviale à l'aide de barges naviguant sur la Marne puis sur la Seine.



4



5

© DOMINIQUE FEINTRENE



6
© DOMINIQUE FEINTRENIÉ

UNE ORGANISATION ADAPTÉE AU CONTEXTE

Au niveau organisationnel, les travaux se sont déroulés moyennant la mise en place deux postes de production, un poste de maintenance sur le tunnelier et une équipe pour les travaux annexes (puits et locaux techniques), exceptions faites de la période de démarrage et des deux traversées sous les voies SNCF qui ont nécessité de travailler 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. □

6- Acteurs du projet VL9, lot 2.

6- Stakeholders in the VL9 project, work package 2.

1- Il s'agit de la zone théorique, fixée par la SNCF, qui définit une distance de part et d'autre des voies de roulage des trains à l'intérieur de laquelle les tassements doivent demeurer en dessous d'un certain seuil. Cette zone, déterminée par le calcul, intègre notamment les paramètres géologiques entre l'ouvrage à réaliser et les voies.

LES ACTEURS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE :

SIAAP - Direction des Grands Travaux

MAÎTRE D'ŒUVRE :

SIAAP - Direction des Grands Travaux - Service Maîtrise d'œuvre

ENTREPRISES :

RAZEL-BEC (pilote technique), Dodin Campenon Bernard, SADE

COORDONATEUR SÉCURITÉ :

COSSEC

ABSTRACT

MAIN DRAIN VL9 WORK PACKAGE 2 IN THE VAL-DE-MARNE REGION: A TUNNELLER UNDER THE RAILWAY TRACKS

PASCAL BARATÉ, RAZEL-BEC

The VL9 project, to optimise the gravity-flow transport of sewage from the Charenton-le-Pont pumping station to the Seine-Amont de Valenton sewage treatment plant, involves constructing 6 km of a gallery located at an average depth of 20 m. The 3200-metre section of work package 2 is a structure of inner diameter 3.00 m, executed by means of an Earth Pressure Balance TBM, with each 1.10-metre ring consisting of six prefabricated reinforced concrete segments (five elements plus a keystone). Since the tunnelling was close to the railway tracks and crossed them on two occasions, the work required the application of strict control procedures and the choice of a special methodology, at the outset, in order to ensure continuous tunnel driving activity. The 70-metre-long backup train was assembled in the gallery of diameter 2.50 m executed beforehand, with the 3.00 m gauge being achieved when passing through the entry shaft, as tunnel driving progressed. The two crossings under the railway tracks were monitored by two power-operated theodolites analysing in detail a bank of appropriately distributed targets. □

COLECTOR VL9 LOTE 2 EN VAL-DE-MARNE: UNA TUNELADORA BAJO LAS VÍAS DE LA SNCF

PASCAL BARATÉ, RAZEL-BEC

El proyecto VL9, que permitirá optimizar la conducción por gravedad de las aguas residuales de la estación de bombeo de Charenton-le-Pont hacia la planta depuradora Seine-Amont de Valenton, consiste en realizar 6 km de galería situada a una profundidad media de 20 m. El tramo de 3.200 m del lote 2 es una estructura de 3,00 m de diámetro interior, realizada con una tuneladora de presión de tierras, en la que cada anillo de 1,10 m está constituido por 6 dovelas (5 elementos más una llave) de hormigón armado prefabricadas. El paso, con dos acometidas, y la cercanía de las líneas de la SNCF requirieron la aplicación de estrictos procedimientos de control, así como la elección de una metodología particular, en el comienzo, para asegurar una excavación en continuo. El tren seguidor, de 70 m de longitud, se ensambló en la galería de 2,50 m de diámetro realizada previamente, ya que el gálibo de paso de 3,00 m se realizó durante el paso a través del pozo de ataque, a medida del avance. Las dos travesías bajo las vías de la SNCF estaban controladas por dos teodolitos motorizados que auscultaban una batería de objetivos repartidos estratégicamente. □



LA BUSSIÈRE ET CHALOSSET : DEUX TUNNELS TRÈS « RÉACTIFS »

AUTEUR : PATRICK RAMOND, DIRECTEUR DES TRAVAUX SOUTERRAINS, RAZEL-BEC

CES DEUX TUNNELS BITUBES DE 1 040 ET 725 m DE LONGUEUR MOYENNE, SITUÉS SUR LE TRACÉ DE L'A89 À PROXIMITÉ DE TARARE, RÉALISÉS EN TRADITIONNEL À L'EXPLOSIF, ONT NÉCESSITÉ UNE COORDINATION SANS FAILLE AINSI QU'UNE GRANDE SOUPLESSE DES ÉQUIPES POUR TENIR LES DÉLAIS RESSERRÉS.

Les tunnels de La Bussière et Chalosset, construits pour le compte de ASF (Autoroutes du Sud de la France), entrent dans le cadre du projet de prolongement de l'autoroute A89 entre Balbigny dans la Loire et la Tour-de-Salvagny dans le Rhône (lire l'encadré). Ces deux ouvrages bitubes, de 70 m² de section finie, situés entre les diffuseurs de Tarare Ouest et Tarare

Est, permettent de contourner la ville par le sud. Malgré des aléas géologiques, qui sont venus perturber le bon déroulement des travaux, le chantier a su optimiser et adapter ses méthodes ainsi que ses moyens, tant humains que matériels, afin de livrer au plus vite les ouvrages. En effet, ces derniers ont fait l'objet d'une mesure « de livraison partielle anticipée ».

1- Têtes de tunnel côté Ouest, Chalosset.

1- Western end tunnel portals, Chalosset.

UN PIANOTAGE DE HAUTE PRÉCISION

La priorité a tout d'abord été mise sur l'achèvement des deux tubes de Chalosset (704 m au nord et 750 m côté sud) - respectivement 1 055 m et 1 030 m pour La Bussière - afin de réduire au maximum le trafic des poids lourds à l'intérieur de Tarare. Pour ce faire, durant certaines phases



© DOMINIQUE FEINTRENIE



© DOMINIQUE FEINTRENIE



de travaux, il a fallu maintenir une activité à trois postes pendant plusieurs semaines, en travaillant six jours sur sept. Côté matériels, un pianotage très précis (pas de doublement des moyens) a dû être instauré entre chacun des tubes et des deux ouvrages. Ainsi, afin de réduire le délai de réalisation des revêtements de Chalosset, un outil coffrant (12,5 m de longueur et près de 150 tonnes pour le coffrage de l'intrados) a été transporté, par le biais des pistes de chantier aménagées pour cet effet, sur une distance de 1 km entre la tête est du tunnel de La Bussière et la tête ouest du tunnel de Chalosset, ce qui a nécessité de faire appel à une société spécialisée (Sarens). Dans la pratique, les quatre tubes ont été creusés - section excavée de 83 à 98 m² selon le type de soutènement mis en œuvre - en traditionnel à l'explosif pompable, avec terrassement en pleine section, à l'aide d'une unité mobile de fabrication de l'explosif. Cette solution, tout en offrant une plus grande souplesse d'utilisation, a permis de limiter la quantité de matière explo-

2- Percement réussi, Chalosset.
3- Tunnel de Chalosset en cours de revêtement.

2- Successful drilling, Chalosset.
3- Chalosset Tunnel undergoing lining.

sive présente sur le site. Les travaux ont été menés en opérant une attaque principale par tube ainsi qu'une contre attaque de faible longueur à chacune des extrémités, en raison de la nature délicate des terrains et afin de préparer au mieux les sorties.

La restriction des créneaux de tirs concernant le tunnel de Chalosset a singulièrement compliqué l'organisation générale des travaux d'excavation, l'avancement s'effectuant à un rythme de 1,50 à 5,00 m par volée.

DES TRAVAUX EXTRÊMEMENT PHASÉS

Notons que les travaux de purge au front de taille ont été effectués majoritairement à la fraise, l'utilisation du BRH ayant été limitée en raison des risques de déstabilisation des terrains que peut engendrer ce dernier.

Les soutènements mis en œuvre sont essentiellement composés de profils avec boulonnage et béton projeté, certaines parties des tunnels nécessitant, de manière ponctuelle, l'utilisation de cintres voire l'enfilage de barres en acier. De plus, une difficulté géologique particulière a dû être surmontée, y compris en terme de planning, dès le début de l'excavation du tube sud de la tête ouest du tunnel de La Bussière imposant en complément d'une voûte parapluie, la réalisation de micropieux sous les appuis des cintres. Lors de la réalisation de cette tête de tunnel, il fut nécessaire d'exécuter un radier traversant sur fondations profondes. En effet, précisons également que le projet comprenait l'exécution des ouvrages voûtés de tête (casquettes). ▷

LE PROLONGEMENT DE L'A89

Le prolongement de l'A89 traverse les départements du Rhône (32 km) et de la Loire (18 km), son tracé comportant 3,5 km de raccordement à l'antenne de l'Abresle. Il s'agit d'une autoroute à 2x2 voies, susceptible d'être élargie à 2x3 voies entre Tarare Est et la Tour-de-Salvagny, qui traverse 22 communes et représente 16 millions de mètres cube de terrassement. Le projet nécessite également la construction de 83 ouvrages d'art courants, 8 viaducs, 3 tunnels (dont La Bussière et Chalosset), 6 échangeurs et une bifurcation.



4



5

© DOMINIQUE FEINTRENIÉ

Considérant leur rythme d'avancement plus faible (un plot bétonné par semaine contre 4 en moyenne à l'intérieur des tunnels), ces travaux étaient menés en parallèle à l'aide d'outils coffrants dédiés. En conséquence, un phasage très complexe a été mis en place, rendu encore plus compliqué lorsque sont venus se greffer les travaux de mise en place des réseaux (fourreaux pour câbles de moyenne et haute tension, caniveaux à fente, collecteurs d'eaux, conduite incendie...). Les effectifs ont atteint 230 personnes (hors sous-traitants), les équipes devant faire preuve d'une réactivité extrême et d'une grande souplesse d'adaptation afin de pouvoir s'adapter à n'importe quelle phase du chantier et pouvoir répondre au moindre changement. □

4- Tunnel de Chalosse revêtu.

5- Vues des coffrages d'une casquette, La Bussière.

4- Lined Chalosse Tunnel.

5- Views of the formwork for a canopy, La Bussière.

SÉCURITÉ ET ÉCOLOGIE

Le maître d'ouvrage ASF s'était engagé dans une démarche ambitieuse afin que l'ensemble des entreprises, œuvrant sur l'A89, fasse de ce projet une référence en matière de chantier « zéro accident ». Dans cette optique, le groupement s'était doté d'une Charte Sécurité affectée entièrement à la prévention des risques et à la préservation de la santé du personnel évoluant sur le chantier. En amont du projet, d'autres engagements avaient été pris envers les différentes associations de protection de la nature et de l'environnement, plusieurs espèces protégées ayant été répertoriées : écrevisses à pattes blanches, sonneurs à ventre jaune... De ce fait, un suivi environnemental sévère avait également été mis en œuvre dès le démarrage du chantier - bacs de rétention, stations de traitement de l'eau et de l'acidité... - afin de garantir la qualité des eaux de rejet. Des modules de sensibilisation à l'environnement ont aussi été organisés régulièrement avec ces associations, le groupement disposant, là encore, d'un chargé Environnement affecté à 100% à la prévention des risques environnementaux et à l'organisation générale du chantier.

LES PRINCIPAUX ACTEURS

GROUPEMENT : RAZEL-BEC (mandataire du chantier de Chalosse) / SPIE Batignolles TPCI (mandataire du chantier de La Bussière)

MAÎTRE D'OUVRAGE : ASF - Autoroutes du Sud de la France

MAÎTRE D'ŒUVRE : EGIS Tunnel

COORDONNATEUR SÉCURITÉ : PRESENTS

FICHE TECHNIQUE

	Tunnel de La Bussière	Tunnel de Chalosse
Délai contractuel	28 mois	24 mois
Longueur excavée	952 m (tube nord) 937 m (tube sud)	646 m (tube nord) 640 m (tube sud)
Longueur revêtue	1055 m (tube nord) 1030 m (tube sud)	704 m (tube nord) 750 m (tube sud)
Ouvrage d'extérieurs à réaliser	2 locaux techniques 1 réservoir incendie 1 bassin de rétention 1 mur antirecyclage des fumées	1 local technique 1 réservoir incendie 1 bassin de rétention
Géologie prévisionnelle	Métavolcano sédiments Gneiss eillés rubanés Siltites, conglomérats	Rhyo-dacites et brèches volcaniques Gneiss oillés rubanés Siltites, pélites, conglomérats Microgranites prophyriques
Autre	1 by-pass piétons 1 by pass véhicule de secours	1 by-pass piétons

ABSTRACT

LA BUSSIÈRE AND CHALOSSET: TWO VERY «REACTIVE» TUNNELS

PATRICK RAMOND, RAZEL-BEC

Construction of the La Bussière and Chalosse tunnels forms part of the extension work on the A89 motorway between Balbigny (Loire) and La-Tour-de-Salvagny (Rhône). These double-tube structures (average lengths 1040 m and 725 m respectively) were executed traditionally, using explosives. Due to the decision not to duplicate equipment, strict work sequencing was required, and various works were carried out simultaneously. At the same time, the teams had to show great adaptability and extraordinary reactivity. □

LA BUSSIÈRE Y CHALOSSET: DOS TÚNELES MUY «REACTIVOS»

PATRICK RAMOND, RAZEL-BEC

La realización de los túneles de La Bussière y Chalosse se inscribe en el marco de las obras de prolongación de la autopista A89 entre Balbigny (Loira) y La-Tour-de-Salvagny (Ródano). Estas estructuras bitubos (longitudes medias de 1.040 y 725 m respectivamente) se ejecutaron de forma tradicional, con explosivos. La decisión de no duplicar los equipos requirió una planificación rigurosa de los trabajos, ya que se realizaban diferentes obras de forma concomitante. Paralelamente, los equipos debían demostrar una gran flexibilidad de adaptación y una reactividad excepcional. □



© CG YVELINES - ARTEFACTO 1

TRAMWAY T6 STATIONS ET TUNNEL DE VIROFLAY

AUTEURS : PHILIPPE GRAVE, EGIS RAILS - VALÉRIE DORE, SOLETANCHE BACHY FRANCE - ÉRIC MORDANT, EIFFAGE TP

LE TRAMWAY T6 EST UNE LIGNE NOUVELLE DE 14 km AU SUD DE PARIS. ELLE COMPREND DES PARTIES SOUTERRAINES : UN TUNNEL DE 1,5 km, DEUX STATIONS DE 43,5 m ET UN TUNNEL D'ARRIÈRE-GARE DE 90 m. LE MARCHÉ GROS ŒUVRE ET GÉNIE CIVIL, SECTION SOUTERRAINE, A ÉTÉ CONFIE AU GROUPEMENT D'ENTREPRISES EIFFAGE TP/SOLETANCHE BACHY FRANCE. CE CHANTIER A NÉCESSITÉ DES TRAVAUX DE PAROIS MOULÉES ET LA RÉALISATION D'UN MASSIF DE COULIS POUR LA MISE EN PRESSION RAPIDE DU TUNNELIER À SON ATTAQUE. ÉGALEMENT, IL A FALLU EXÉCUTER UN TRAITEMENT PAR INJECTION, UNE VOÛTE PARAPLUIE ET DES SOUTÈNEMENTS PAR PIEUX ET MICROPIEUX.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET ET DU GROUPEMENT DE MAÎTRISE D'ŒUVRE

À sa mise en service, la sixième ligne de tramway du réseau RATP reliera Châtillon (Hauts-de-Seine) à Viroflay (Yvelines). Longue de 14 km, cette ligne nouvelle de tramway sur pneus à guidage central vise à faciliter les déplacements des 150 000 personnes

vivant ou travaillant à moins de 500 m de la ligne : elle améliore notamment la desserte de Vélizy-Villacoublay et de son pôle d'activité.

Le tracé de cette ligne a été conçu pour favoriser les correspondances avec le réseau déjà existant dans le sud-ouest parisien : ligne 13 du métro (Châtillon), RER C et ligne N du Transilien (Viroflay Rive Gauche), ligne L du Transilien (Viroflay Rive Droite), ainsi que les

**1- Vue d'artiste
de la gare de
Viroflay.**

**1- Artist's view
of Viroflay
Station.**

lignes de bus de la RATP et de Phébus. Située sur deux départements, cette opération est portée par les Conseils Généraux des Hauts-de-Seine et des Yvelines pour la partie infrastructure (environ 380 M€ investis par l'État, la région Île-de-France, les départements 78 et 92 et la RATP), chacun étant maître d'ouvrage sur son territoire, ainsi que la RATP pour la partie système de transport (matériel roulant

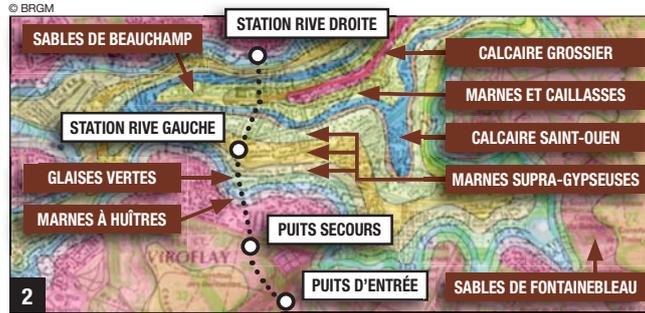
et équipements de la ligne). Ces trois maîtres d'ouvrage ont fait appel à plusieurs équipes de maîtrise d'œuvre pour concevoir le projet et gérer les interfaces entre tous les acteurs.

La ligne, qui comporte plusieurs ouvrages d'art, comprend une partie souterraine constituée d'un tunnel de 1,5 km, de deux stations souterraines profondes et d'un tunnel d'arrière-gare d'environ 90 m.

Située sur le territoire de Viroflay, cette section permet de faire le lien entre Vélizy-Villacoublay et les deux gares Rive Gauche et Rive Droite en cheminant d'abord sous la forêt de Meudon, puis sous le bâti dense et majoritairement pavillonnaire de Viroflay.

Désigné fin 2006 à l'issue d'un concours, le groupement de maîtrise d'œuvre en charge de l'infrastructure et du second œuvre/équipements de la section souterraine est composé d'Egis Rail (mandataire) et de l'Atelier Schall (architecte). Les stations, d'une longueur de 43,5 m environ, ainsi que leurs accès, ont été implantées en prenant en considération l'exiguïté du site et la nécessité de créer un lien direct avec les gares ferroviaires existantes pour faciliter les correspondances : escalier mécanique à Viroflay Rive Gauche et prédispositions pour réaliser un couloir de correspondance souterrain, ascenseur débouchant sur les quais de la gare SNCF à Viroflay Rive Droite.

À l'intérieur des stations, le groupement de maîtrise d'œuvre a opté pour la transparence en concevant des stations de type « cathédrale », ouvertes entre le niveau quai et la dalle des locaux techniques situés sous la voirie. D'élégantes arches enjambant la plate-forme du tramway font écho aux arcades du



2- Carte géologique.
3- Puits d'entrée - réalisation de la paroi au coulis avec outillage KS.
4- Profil en long géotechnique.

2- Geological map.
3- Entry shaft - execution of the grout wall with a KS tool.
4- Geotechnical longitudinal profile.

pont ferroviaire situé à proximité et symbole de Viroflay. Les mezzanines, espaces permettant l'orientation des flux de voyageurs, sont métalliques et suspendues aux arches.

Le caractère brut des parois moulées apparente contraste avec le béton clair des arches et avec le raffinement des équipements et des matériaux de revêtement : quais en basalte et en granit, parquets des mezzanines en chêne, tympans des stations en béton poli (figure 1).

Le tracé a été ajusté aux implantations des stations et des ouvrages ferroviaires à proximité immédiate

(mur de soutènement et fondations du bâtiment voyageurs de la gare SNCF à Viroflay Rive Gauche, talus supportant voies et quais à Viroflay Rive Droite), aux contraintes topographiques et aux tolérances du matériel roulant. Le tracé passe également sous le collecteur du ru de Marivel et sous le viaduc ferroviaire de la ligne La Défense-La Verrière au niveau de la RD10. Le projet comprend un puits de secours en lisière de la forêt de Meudon et un puits d'entrée sous la branche montante de la RD53 qui a dû être dévié pour permettre sa réalisation.

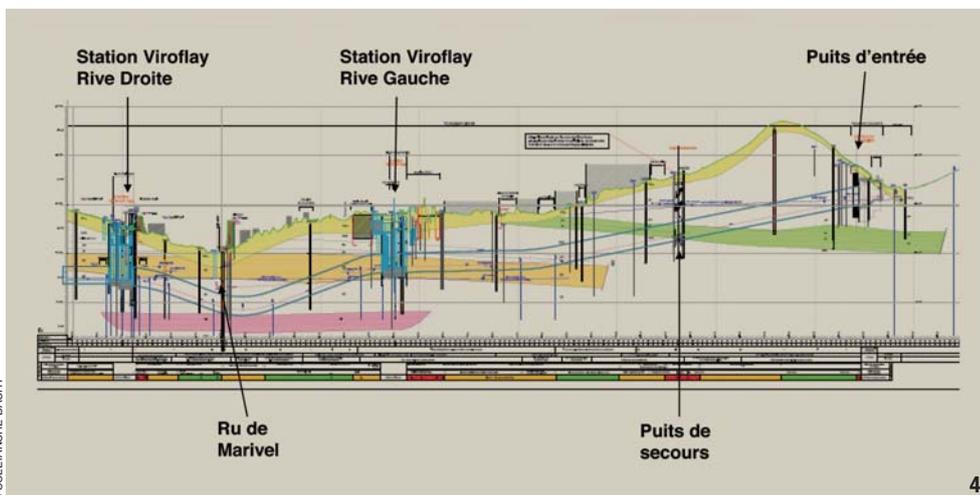
Plusieurs années d'études ont été nécessaires pour concrétiser ce projet. Elles ont été mises à profit pour échanger, d'une part avec les autres maîtres d'œuvre impliqués dans le projet, et d'autre part avec les tiers. Des études très poussées ont ainsi été menées sur les ouvrages impactant les infrastructures ferroviaires et les ouvrages existants. De nombreuses rencontres ont eu lieu avec les concessionnaires des réseaux qui seront déviés plusieurs fois en raison de l'exiguïté du site. Les contacts avec les services techniques de la ville de Viroflay ont également été multiples pour définir les principes permettant de limiter les nuisances à l'égard des riverains et pour finaliser l'aménagement futur de la voirie au droit des stations.

Les travaux dits « préparatoires » ont démarré en mai 2011 avant une première phase de dévoiement de réseaux. Le déboisement des parcelles nécessaires à la réalisation du chantier a eu lieu à l'automne 2011, durant la période de préparation du marché principal de gros œuvre et génie civil. Les travaux de libération des emprises prévus dans ce marché ont démarré le 9 décembre 2011, première étape de la réalisation des ouvrages proprement dits.

GROUPEMENT D'ENTREPRISES ADJUDICATAIRE DU MARCHÉ DU LOT T1

Le marché du tramway Châtillon - Vélizy - Viroflay, gros œuvre et génie civil, section souterraine, a été confié au groupement d'entreprises Eiffage TP/Soletanche Bachy France pour un montant de 86,8 M€ HT.

Soletanche Bachy France a en charge la réalisation des parois moulées et travaux spéciaux pour l'ensemble des sites (les deux stations, le puits de secours et de ventilation et le puits d'entrée).





5a
© SOLETANCHE-BACHY

Eiffage TP a en charge les travaux de génie civil des stations, du puits d'entrée et du puits de secours, le creusement du tunnel au tunnelier, un tronçon de plate-forme aérienne, le rechargement du tunnel, la couche de roulement et les aménagements de surface.

PAROI MOULÉE ET TRAVAUX SPÉCIAUX RÉALISÉS PAR SOLETANCHE BACHY FRANCE

GÉOLOGIE RENCONTRÉE PAR LE PROJET

Le tracé de la section souterraine recoupe quasiment l'ensemble des couches sédimentaires du tertiaire de la région parisienne.

La topographie locale relativement vallonnée conduit à traverser une grande variété de terrains sédimentaires, allant des dépôts du quaternaires au calcaire Lutétien de l'Eocène (Tertiaire), en balayant les étages marneux et sableux (figure 2).

Les études géotechniques ont révélé la présence de trois nappes aquifères distinctes (figure 4) :

→ Nappe des Sables de Fontainebleau, libre et soutenue par les glaises vertes quasi-imperméables ;

→ Nappe des calcaires du Lutétien, qui baigne sur 12 m le Calcaire Grossier (cette nappe tangente les radiers des stations Viroflay Rive Gauche et Viroflay Rive Droite) ;

→ Nappes perchées isolées alimentées par la nappe des Sables de Fontainebleau.

TRAVAUX SPÉCIAUX

Au sein du groupement d'entreprises, Soletanche Bachy France est chargé des travaux spéciaux. Ceux-ci se concentrent sur les 4 ouvrages émergents du Sud vers le Nord : puits d'entrée, puits de secours, station Viroflay Rive Gauche et station Viroflay Rive Droite.

Travaux spéciaux du puits d'entrée

En phase définitive d'exploitation du tramway, le puits d'entrée est une tranchée couverte qui permet la transition entre la section aérienne et le

5a & 5b- Puits de secours - réalisation de la paroi moulée avec outillage KS.

5a & 5b- Escape shaft - execution of the diaphragm wall with a KS tool.

tunnel proprement dit. En phase provisoire, pendant que la circulation de la RD53 est déviée, il va servir de point de démarrage du tunnelier. L'ouvrage est constitué de 2 parois moulées parallèles, d'épaisseur 0,80 m, de profondeur variable de 14 à 16 m, réalisées avec une benne hydraulique de type KS.

À l'avant de cet ouvrage, une zone de 2.200 m³ sur 14 m de long de massif au coulis a été réalisée dans les Sables de Fontainebleau avec le même outillage, afin de permettre la mise en pression rapide du tunnelier malgré la faible couverture (figure 3).

Travaux spéciaux du puits de secours

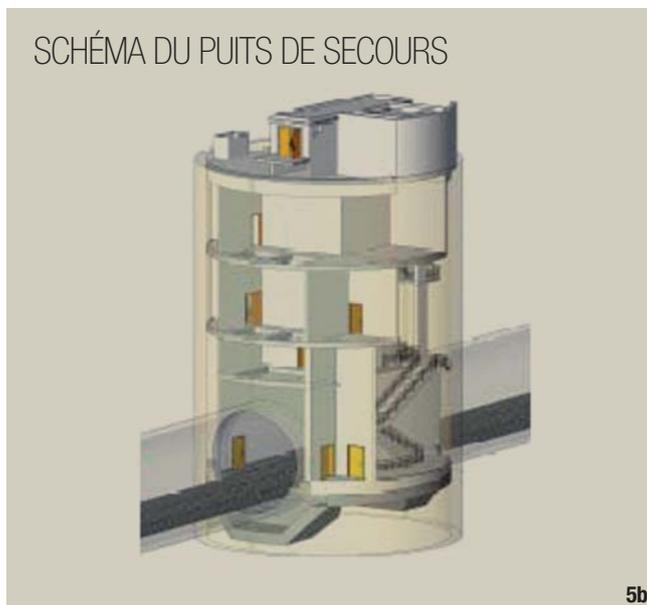
Situé en lisière de la forêt de Meudon, en limite de la commune de Viroflay, le puits de secours consiste en un puits cylindrique de 17 m de diamètre et de 30 m de profondeur. Il aura pour fonction d'assurer la ventilation en service normal et de permettre l'éventuelle évacuation de secours du tunnel pendant l'exploitation du tramway.

L'enveloppe extérieure du puits est constituée par une paroi moulée, d'épaisseur 0,80 m, réalisée avec une benne hydraulique de type KS équipée avec le système de contrôle SAKSO, afin de garantir la tolérance de verticalité de 0,5% (figures 5a et 5b).

Travaux spéciaux des stations Rive Gauche et Rive Droite

Viroflay est une ville ancienne, qui trouve son origine au XIV^e siècle. Charmante avec ses petites rues tranquilles,

SCHÉMA DU PUIS DE SECOURS



5b



© SOLETANCHE-BACHY / CEDRIC HELSIKY

la ville est desservie par deux gares du réseau transilien : Viroflay Rive Gauche reliée à Paris Montparnasse, et Viroflay Rive Droite reliée à Paris Saint-Lazare. Les chantiers des deux futures stations de tramway reliées aux stations existantes sont caractérisés par une exiguïté extrême et des voies d'accès étroites.

Par ailleurs, le maintien des voies de circulation piétons et véhicules au droit des futurs ouvrages a réduit l'espace disponible pour les emprises et nécessité de réaliser les travaux de paroi en deux phases pour chaque station.

Les parois périmétrales des stations enterrées sont constituées par de la paroi moulée d'épaisseur 1 m, descendue à 30 m, et ancrée dans le Calcaire Grossier (figures 6 et 7). Compte tenu de la proximité des bâtiments tiers (ouvrages SNCF ou propriétés riveraines), Soletanche Bachy France a proposé un outillage de type Hydrofraise, afin de limiter les vibrations engendrées par la perforation dans le Calcaire Grossier. Par ailleurs, du fait de l'exiguïté des emprises, une mini-fraise, l'Hydrofraise Compacte HC03, a été mise en œuvre. Le contrôle de verticalité du forage est assuré par le système ENPAFRAISE embarqué

sur l'HC03 (tolérance fixée à 0,5%). La nature marneuse, voire argileuse, des terrains entre 0 et 15-20 m environ n'est pas favorable à une perforation à la fraise : cette zone est donc préalablement perforée avec une benne hydraulique de type KS.

C'est ainsi que trois grues sur chenilles ont dû évoluer sur des emprises réduites de l'ordre de 1400 m², exigeant les mesures particulières suivantes :

→ Anticipation de chaque mouvement d'engin ;

→ Alternance de phases de perforation et des phases de bétonnage : la perforation a rarement pu coexister avec des bétonnages ;

→ Mise en œuvre d'une grue télescopique sur chenilles (contrairement aux grues treillis de manutention habituelles) de façon à ce qu'elle puisse agir, quelle que soit sa position dans l'emprise ;

→ Stockage impossible des cages d'armatures, et donc livraison et équipement dans le panneau le jour même ;

→ Décantation impossible des déblais de paroi sur site, utilisation du site du puits de secours comme zone de décantation avant reprise et évacuation en décharge ;

6- Paroi moulée de la station VRG.

7- Paroi moulée de la station VRD.

8 & 9- Centrales de traitement de boue pour la paroi moulée des stations VRG et VRD.

6- VRG (Viroflay Left Bank) station diaphragm wall.

7- VRD (Viroflay Right Bank) station diaphragm wall.

8 & 9- Sludge treatment plants for the diaphragm wall of the VRG and VRD stations.

→ Stationnement provisoire des touppes de béton sur une zone définie en concertation avec la ville de Viroflay, la zone étant distincte et éloignée de l'emprise des travaux ;

→ Création d'une base arrière pour les ateliers de mécanique et de soudure, et pour le stockage des pièces de rechange sur le site du puits de secours.

L'installation de fabrication et de traitement de boue n'a pas été en reste, puisque les systèmes de fabrication, de traitement et de stockage des 450 m³ de boue ont dû tenir sur une petite emprise de 150 m² sur chaque station. Ceci a nécessité des moyens de manutention lourds et une procédure adaptée pour installer le matériel sur 5 niveaux (figures 8 et 9).



10



11



12

© SOLETAICHE BACHY

Cas particulier de la station VRD

Dans sa partie Sud, en bordure des voies SNCF, le tracé de la paroi moulée de la station VRD se trouve au droit du quai existant, le quai se situant à une cote de 3 m environ au-dessus du niveau de la paroi moulée à réaliser. Le quai doit donc être démolé en partie avant la paroi moulée et les voies mitoyennes doivent être soutenues par une berlinoise constituée de tubes micropieux.

Compte tenu du maintien de matériels SNCF sur le quai, l'exiguïté sur le quai a contraint l'équipe à trouver une solution pour forer les micropieux sans positionner de foreuse au droit des micropieux. Les micropieux ont donc été forés sur le quai avec une glissière courte montée sur une pelle Kobelco, la pelle « Acro-

bat », installée sur une plate-forme en contre-bas du quai (figure 10).

Du fait des différences de niveau présentées par le terrain naturel dans le sens nord-sud et ouest-sud de l'ordre de 2,50 m, la réalisation des parois moulées a nécessité de mettre en œuvre, au fur et à mesure de l'avancement des travaux, des plates-formes de travail provisoires quasi-horizontales, soutenues par une série de murs en L, sur lesquelles ont évolué les engins (figure 11).

TERRASSEMENT, GÉNIE CIVIL DES OUVRAGES ÉMERGENTS, ET TUNNEL RÉALISÉS PAR EIFFAGE TP

La section souterraine comprend 4 ouvrages émergents : le puits d'en-

10- Pelle Acrobat pour réalisation des micropieux sous le quai VRD.

11- Plateforme provisoire pour réalisation des parois moulées.

12- Montage du tunnelier.

10- Acrobat shovel for execution of micropiles under the VRD platform.

11- Temporary formation for execution of the diaphragm walls.

12- TBM assembly.

trée, le puits de secours et de ventilation, la station Viroflay Rive Gauche et la station Viroflay Rive Droite avec sa galerie d'arrière gare de 95 m.

Le creusement entre ces 4 ouvrages se fait à l'aide d'un tunnelier Herrenknecht à pression de terre, préalablement utilisé sur le chantier du prolongement de la ligne 12 (9,17 m de diamètre pour une galerie finie de 8 m, composée d'anneaux de 7 voussoirs de 0,40 m d'épaisseur et de 1,80 m de longueur). Le démarrage du creusement prévu en mars 2013 se fera depuis le puits d'entrée.

Actuellement, le tunnelier est en cours de reconditionnement et de montage depuis son arrivée sur le chantier en février/mars 2012. De gros travaux de soudure sont actuellement réalisés

pour rassembler les éléments de la roue de coupe et de la jupe non transportables (ø 9,17 m) en un seul bloc. Les remorques sont déjà positionnées sur le radier du train suiveur en surface (figure 12).

LE Puits d'entrée et ses installations

Ce site, base vie principale du chantier, est situé en milieu forestier sur la commune de Vélizy.

Lors de la réalisation de l'ouvrage, il est nécessaire de procéder, pour les travaux de parois moulées, en deux phases afin de dévier provisoirement sur la dalle ouest de l'ouvrage, la RD53. Après terrassement, le radier est réalisé, ainsi que les travaux d'aménagement permettant d'accueillir le tunnelier. Le bouclier du tunnelier, monté à l'extérieur, sera ripé jusqu'à son point de démarrage.

Suivra alors le montage du bâti de poussée, le raccordement entre le bouclier et les remorques du tunnelier, le montage des deux premiers anneaux, la réalisation d'un mur masque autour du premier anneau qui permettra de créer un sarcophage dans lequel se trouvera le bouclier.

Après remplissage de ce sarcophage, le tunnelier pourra enfin démarrer le creusement en toute sécurité (figure 13).



13
© SOLETANCHE-BACHY

13- Réalisation du puits d'entrée du tunnelier et mise en place du train suiveur.

14- Dalle de couverture Viroflay Rive Gauche.

13- Execution of the TBM entry shaft and moving the backup train into position.

14- VRG (Viroflay Left Bank) cover slab.

LES STATIONS VIROFLAY RIVE GAUCHE ET VIROFLAY RIVE DROITE

Les stations sont de forme rectangulaire et mesurent 50 m de long sur 14 à 20 m de large, pour une profondeur moyenne de 25 m. La surface intérieure de chaque station est d'environ 950 m². Elles sont limitrophes aux gares SNCF déjà existantes.

Comme pour les travaux spéciaux, les particularités des deux sites (exiguïté très forte, proximité des avoisinants, présence de nombreux réseaux, contexte urbain très dense, travail à proximité et à l'intérieur du domaine SNCF) exi-

gent une organisation et un suivi de travaux rigoureux. En effet, les stations intègrent de nombreuses difficultés : délai d'exécution très court, faibles emprises de stockage et de circulation, interfaces avec les ouvrages SNCF, réalisation d'arches de 15 m de haut. La période de préparation a permis d'élaborer les méthodes de fond, afin d'optimiser au maximum le phasage et le planning.

Cette période de préparation s'est achevée par la mise en place de différentes solutions : travail en postes et gestion des travaux pouvant se dérouler en temps masqué, établissement de carnets de phasage et de circulation sur chaque site particulièrement approfondis (cinq grandes phases sur la station Viroflay Rive Gauche et 10 grandes phases sur Viroflay Rive Droite). Voici la méthodologie de réalisation des deux stations :

1) Réalisation de la dalle de couverture après l'achèvement des parois moulées, puis remblaiement de la dalle, afin de rétablir les réseaux, puis travail en taupe (figure 14).

L'ensemble du terrassement et génie civil est réalisé en sous-œuvre.

2) Excavation des terres en taupe jusqu'au radier en réalisant un butonnage provisoire pour garantir la stabilité des parois moulées. ▶



© SOLETANCHE-BACHY

14

3) Réalisation du radier, afin de permettre à Viroflay Rive Gauche la traversée du tunnelier et à Viroflay Rive Droite son démontage.

4) Après le passage du tunnelier, réalisation du génie civil (arches, dalle des locaux techniques,...).

Chaque station dispose de deux accès à réaliser. Ces accès permettront de relier le futur tramway aux gares existantes.

De plus, la station Viroflay Rive Droite étant le terminus du tunnel, elle disposera d'une arrière-galerie de 90 m servant au garage des rames de tramway. Elle est réalisée en méthode dite traditionnelle (figure 15).

LE Puits DE SECOURS ET DE VENTILATION

De forme circulaire et de 17 m de diamètre, le puits sera constitué de 87 t d'armatures et de 870 m³ de béton armé. Le tunnelier passera boîte pleine puis suivront le terrassement et le démontage des anneaux à l'achèvement du creusement du tunnel.

Les travaux de génie civil prendront ensuite le relais.

CONCLUSION

Durant toute l'année 2012, la priorité des efforts de l'ensemble des partenaires du projet a été portée sur le démarrage des travaux des stations Rive Gauche et Rive Droite, qui vont accueillir successivement le tunnelier, courant 2013.

Face à ce chantier qui a bouleversé leur tranquillité et leurs habitudes, les habitants de Viroflay et plus précisément les riverains des chantiers des deux futures stations souterraines ont fait contre mauvaise fortune bon cœur. Le groupement ne désespère pas, d'ailleurs, d'avoir créé - pourquoi pas ! - quelques vocations pour les travaux souterrains.



15

© SOLETANCHE BACHY

15- Installations à Viroflay Rive Droite.

15- VRD (Viroflay Right Bank) installations.

Le tunnelier doit partir du puits d'entrée en mars 2013, traverser le puits de secours, puis après un passage sous les voies SNCF de la station Rive Gauche, être accueilli sur le radier de la future station de tramway ; ensuite, après un passage sous le ru de Marivel, il devrait arriver en fin d'année 2013 à la future station souterraine Viroflay Rive Droite. Mais cela, c'est une autre histoire... □

INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil Général des Yvelines
MAÎTRE D'ŒUVRE : Groupement EGIS RAIL - PIERRE SCHALL
BUREAU DE CONTRÔLE : QUALICONSULT
COORDINATEUR SPS : PRESENTS
ENTREPRISE ADJUDICATAIRE : Groupement EIFFAGE TP / SOLETANCHE BACHY FRANCE

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROI AU COULIS : 1100 m³
PAROI MOULÉE : 12000 m²
PIEUX JOINTIFS Ø 600 mm : 193 u, 3077 m
VOÛTE PARAPLUIE : 61 forages, 1525 m
PIEUX BERLINOIS Ø 500 mm : 48 u, 550 m
MICROPIEUX DE SOUTÈNEMENT : 600 m
TRAITEMENT DE TERRAIN AU COULIS DE CIMENT : 900 m de forage

ABSTRACT

T6 TRAMWAY VIROFLAY STATIONS AND TUNNEL

P. GRAVE, EGIS RAILS - V. DORE, SOLETANCHE BACHY FRANCE - E. MORDANT, EIFFAGE TP

The T6 tramway is a new 14 km line south of Paris. It includes underground sections: a 1.5 km tunnel, two stations 43.5 m long and a 90-metre turnaround tunnel. The structural work and civil engineering contract for the underground section was awarded to the Eiffage TP/Soletanche Bachy France consortium. This project required diaphragm wall works and the execution of a grout foundation for rapid pressurising of the TBM at its working face. Injection treatment, an umbrella arch and pile and micropile retaining structures also had to be executed. □

TRANVÍA T6 ESTACIONES Y TÚNEL DE VIROFLAY

P. GRAVE, EGIS RAILS - V. DORE, SOLETANCHE BACHY FRANCE - E. MORDANT, EIFFAGE TP

El tranvía T6 es una nueva línea de 14 km al sur de París. Incluye tramos subterráneos: un túnel de 1,5 km, dos estaciones de 43,5 m y un túnel de estación de fondo de 90 m. El contrato de obra gruesa y de ingeniería civil, sección subterránea, se confió a la agrupación de empresas Eiffage TP / Soletanche Bachy France. Esta obra precisó muros pantalla y la realización de un macizo de mortero para la puesta a presión rápida de la tuneladora en su ataque. También fue necesario realizar un tratamiento por inyección, una bóveda paraguas y entibados mediante pilotes y micropilotes. □



© LGV EST - GROUPEMENT LOT 47 - JEAN-MARC BANNWARTH

LGV EST EUROPÉENNE, TUNNEL DE SAVERNE

AUTEURS : ALAIN CUCCARONI, DIRECTEUR D'OPÉRATION, RFF - NORA ZEHANI, CHARGÉE DE PROJET DU TRONCON H, RFF - ALAIN LACROIX, DIRECTEUR DE PROJET, SPIE BATIGNOLLES TPCI - PIERRE BOUVATIER, RESPONSABLE CONCEPTION, BG INGENIEURS CONSEILS - JEAN SOUSA, RESPONSABLE DE LA CONDUITE D'OPÉRATION, SETEC - PHILIPPE LEGRAND, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN RESPONSABLE DU SUMI DES TRAVAUX AU SEIN DE LA CONDUITE D'OPÉRATION, TERRASOL

LE TUNNEL DE SAVERNE PERMET LA TRAVERSÉE DES VOSGES DU NORD PAR LA LGV EST EUROPÉENNE. IL EST INTÉGRÉ AU LOT 47 DONT LES TRAVAUX ONT ÉTÉ LANCÉS EN PROCÉDURE DE CONCEPTION-RÉALISATION. C'EST UN OUVRAGE BI-TUBE DE 4 km DE LONG, CREUSÉ AU TUNNELIER, COMPORTANT SEPT GALERIES INTERTUBES. SA CONCEPTION A ÉTÉ ENCADRÉE PAR DES RÉFÉRENTIELS EXIGEANTS, NOTAMMENT EN MATIÈRE DE SÉCURITÉ. LES TRAVAUX COMMENCÉS EN 2011 SONT PRÉVUS SE TERMINER EN 2014.

PRÉSENTATION

Le tunnel de Saverny, ouvrage emblématique de la deuxième phase de la ligne grande vitesse est européenne, est intégré au lot 47, dont les travaux ont été lancés en procédure de conception-réalisation. Creusé dans le massif des Vosges du

Nord, il est composé de deux tubes, une voie par tube, sur un peu plus de 4 km de long.

Ces ouvrages sont reliés entre eux par des galeries de liaison espacées tous les 500 m.

l'instruction technique ministérielle n°98-300 relative à la sécurité dans les

1- Montage du tunnelier.

1- TBM assembly.

tunnels ferroviaires et la STI « sécurité dans les tunnels ferroviaires » ont été prises en compte dans leur intégralité dès la conception de l'ouvrage. Le contexte géologique et la contrainte forte de délai ont conduit le groupement à opter pour une excavation du bitube au tunnelier.

LA LGV EE PHASE II

Le tronçon H et le tronçon G constituent le linéaire de la deuxième phase de la LGV Est Européenne.

D'une longueur de 106 km cette deuxième phase complète le projet de liaison à grande vitesse de Paris à Strasbourg permettant de relier ces deux villes en 1h50. La mise en service est prévue en 2016.

DESCRIPTIF DU PROJET

Le tunnel de Saverne est un ouvrage ferroviaire qui permet à la LGV de franchir le massif des Vosges du Nord dans sa partie la plus étroite.

Le lot 47 à l'intérieur duquel se situe le tunnel fait partie du tronçon H, actuellement en construction, dont les travaux ont été lancés le 1^{er} octobre 2010 selon une procédure de conception-réalisation.

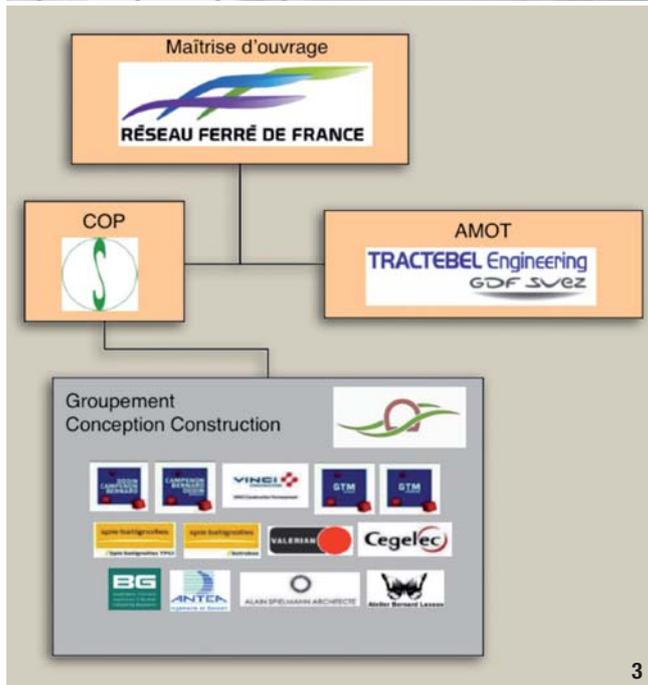
Le tunnel de Saverne est un bi-tube de 4 km de long dont 3 870 m sont réalisés au tunnelier. Le diamètre d'excavation est de 10 m pour un diamètre intérieur final après revêtement de 8,90 m. Il est réalisé avec une pente moyenne de 1,9% soit une différence de 70 m entre la tête Ouest située sur le plateau Lorrain et la tête Est en plaine d'Alsace. Les 130 m non excavés sont réalisés sous forme de tranchées couvertes (faux tunnels) qui seront remblayées à terme afin de recréer le paysage d'origine.

Les deux tubes, un pour chaque sens de circulation sont reliés par 7 inter-tubes intégrant pour certains des locaux techniques (figure 2).

RECOURS À LA PROCÉDURE DE CONCEPTION-RÉALISATION

La construction du tunnel de Saverne sur une durée de 4 ans est sur le chemin critique de la mise en œuvre de l'ensemble de cette phase II.

Dès lors, RFF a considéré comme judicieux de confier l'ensemble de la conception et de la réalisation à un groupement unique d'entreprises et



2- Photo-simulation du tunnel de Saverne.

3- Organigramme fonctionnel Conception/Construction du Lot 47.

4- Tracé du tunnel.

2- Photo simulation of Saverne Tunnel.

3- Design/Build functional organisation chart for work package 47.

4- Tunnel alignment.

bureaux d'études. Ce choix permet du fait même des méthodes spécifiques retenues par le groupement de contribuer, dès la conception, à fiabiliser le délai pour une mise à disposition de l'ensemble du lot 47 au futur marché d'équipements ferroviaires, de faire émerger la solution optimale en matière de réalisation et de susciter l'opposition de solutions alternatives innovantes (figure 3).

SÉLECTION DES DONNÉES D'ENTRÉES

Le recours à une procédure de conception-réalisation dans le cadre d'un mar-

ché global et forfaitaire nécessite des appels d'offres de fournir toutes les données d'entrées existantes afin que le groupement produise son propre projet dont il gardera la responsabilité en tant que concepteur. Ceci nécessite que le Maître d'Ouvrage et son conducteur d'opération fournissent un programme précisant les besoins fonctionnels du projet que doit garantir le groupement. Compte tenu du cadre ferroviaire dont les exigences en matière de qualité, de sécurité, de sûreté et de maintenance sont très fortes, très rapidement, RFF a considéré comme important de conforter la description du programme en s'appuyant sur un véritable dossier technique de référence de niveau PRO. Ce dossier a été établi par SETEC.

Après une étude multi-critères détaillée menée par SETEC et portant sur cinq types de conception, la solution technique de référence retenue par RFF a été la solution en bi-tube creusé au tunnelier. Le dossier inclut le génie civil du tunnel mais aussi l'ensemble des équipements de sécurité car ces derniers sont indissociables du choix de génie civil fait. Durant la mise au point du programme, de multiples échanges ont eu lieu avec le concepteur du marché d'équipements ferroviaires de manière à anticiper au mieux les interfaces liés à la conception et à la réalisation des ouvrages de chacun des deux marchés. Cette étude préalable a permis de peaufiner le programme de la consultation qui caractérise la fonction de l'objet et non pas comme un marché de travaux classique une description de l'ouvrage à construire.

Le programme inclut également :

- L'interprétation à retenir sur certains textes réglementaires comme les eurocodes sismiques et spécifications techniques d'interopérabilité (STI) ;
 - La limite des différentes prestations ;
 - L'expression des difficultés particulières identifiées ;
 - Les conditions d'interfaces avec les tiers ;
 - Les modalités de fonctionnement entre l'ingénierie intégrée et les entreprises au sein du groupement ;
 - Les modalités de fonctionnement avec l'entité de contrôle extérieur au groupement mis en place par RFF.
- Au stade de l'appel d'offres, le maître d'ouvrage a laissé ouvert les options suivantes :
- Creusement traditionnel ou au tunnelier ;
 - Configuration bitube ou monotube cloisonné, avec cheminement inter-tubes tous les 500 m.



Compte tenu de la position primordiale du tunnel de Saverne dans la cinématique de l'opération de la 2^e phase de la construction de la LGV Est Européenne, il était attendu des candidats qu'ils préconisent la méthode la plus pertinente notamment au vu de la sécurisation globale des délais.

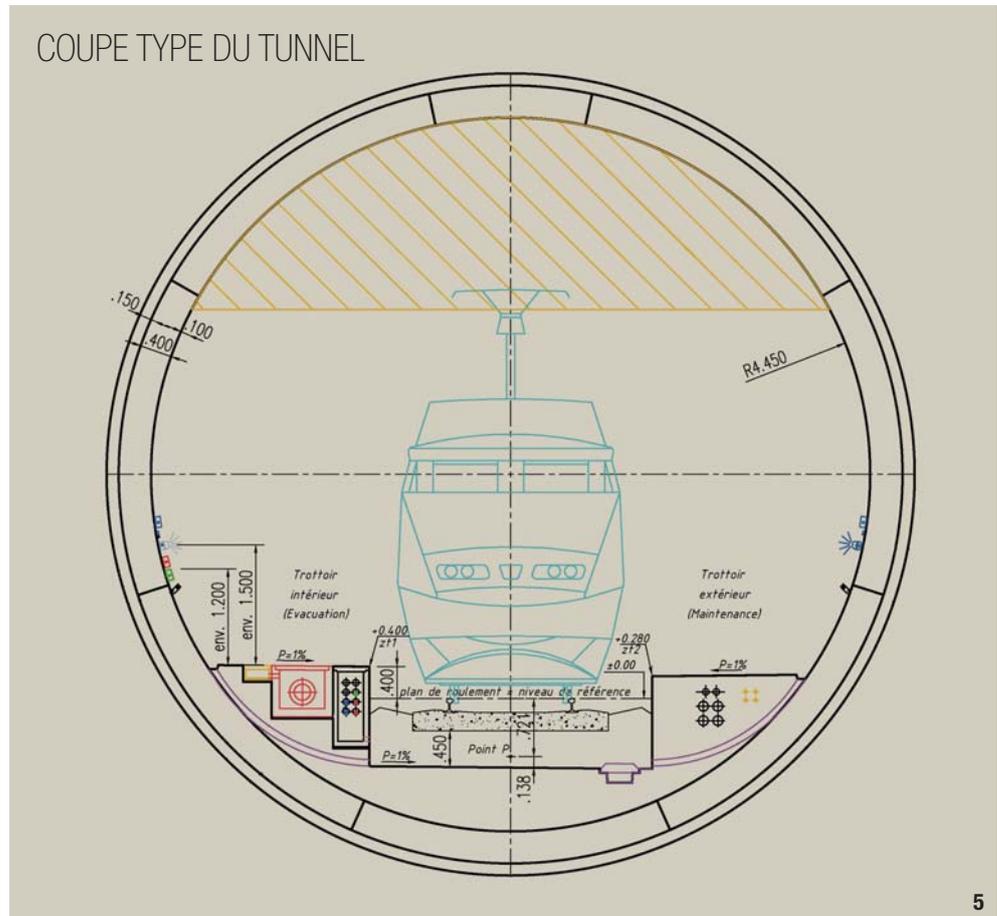
Sur la base de l'analyse menée en phase d'offre par le groupement (entre novembre 2009 et mars 2010), la configuration de l'ouvrage en bitube et creusement au tunnelier a été définitivement validée, toute autre solution ayant été écartée, soit pour des raisons de fiabilité des délais, soit à cause des ouvrages complémentaires à réaliser, soit à cause d'un aléa trop fort dans les cadences envisageables.

CONCEPTION DU TUNNEL RÉFÉRENTIEL

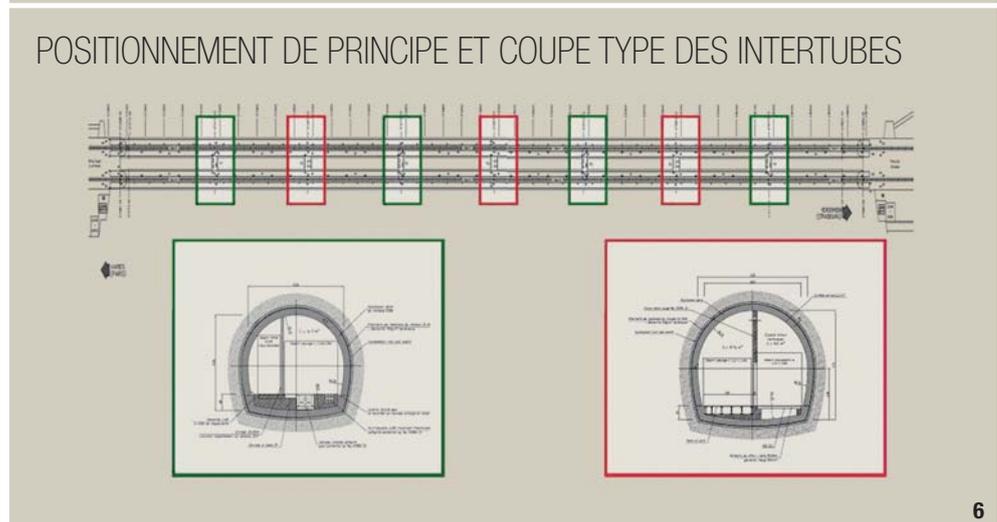
La conception est basée principalement sur ITI 98-300, la STI SRT, l'IN 3278 (référentiel LGV) et le programme de RFF, ce dernier document ayant été particulièrement détaillé afin de garantir la parfaite réponse fonctionnelle de l'ouvrage aux besoins de l'exploitant. Concernant la conception, il inclut notamment l'interprétation de textes réglementaires ou législatifs parfois ambigus ou imprécis ainsi que les limites des prestations à réaliser (interfaces Équipements Ferroviaires notamment). À l'instar de la circulaire du 26 mars 2010 relative à l'articulation entre la STI et l'ITI 98-300, en cas de pluralité de normes, il a toujours été appliquée le référentiel le plus contraignant entre les contraintes nationales et européennes.

PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT

Sur la base d'un projet de référence développé par le conducteur d'opération et joint aux documents d'appels d'offres, les candidats retenus par RFF lors de la procédure de septembre 2009 ont remis une offre en mars 2010, contenant un nouveau dossier complet de conception, de niveau « PRO » (dit DOS 1). Ce dossier a ensuite été complété par les précisions apportées lors des échanges questions/réponses de la phase de mise au point du marché et le tout a été intégré au marché signé en octobre 2010. La durée de la procédure a donc été d'environ 13 mois entre la première publication au JOCE et la signature du marché. Dès signature du marché, la maîtrise d'œuvre du groupement a complété et mis à jour le dossier « PRO » entre octobre 2010



© SETEC



© SETEC

et mars 2011. L'objectif de cette phase était double :

→ Lever les réserves émises par le MOA et ses conseils (les réserves faisant partie intégrantes du marché) : il s'est agit de fournir des justifications complémentaires permettant de consolider définitivement les solutions définies au « PRO » et d'éviter notamment le report de certaines justifications à des phases ultérieures, à un stade où

5- Coupe type du tunnel.

6- Positionnement de principe et coupe type des intertubes.

5- Typical section of the tunnel.

6- Schematic location and typical section of the intertubes.

la difficulté à définir des solutions alternatives et les risques délais auraient été largement amplifiés ;

→ Porter la conception à un niveau permettant la préparation des travaux et le lancement des études d'exécution. Cette phase, soldée par une approbation formelle du Maître d'Ouvrage, s'est terminée avec la diffusion des OS de commencement des travaux proprement dits en mars 2011.

La phase exécution en terme de génie Civil du tunnel a été principalement portée en 2011, sauf pour les parties d'ouvrages les plus lointaines en phase de réalisation (intertubes, puis génie civil secondaire en tunnel : trottoirs, multitubulaires, ...). Pour les équipements, les études d'exécutions ont démarré en 2012 pour un début des travaux projeté en mars 2013.

Il convient de noter que tout au long de ces phases, des modifications de conception ont pu être intégrées dans le cadre d'une procédure stricte visant à vérifier la parfaite adéquation de ces modifications avec les contraintes et objectifs de RFF (conformité réglementaire, performance, maintenabilité, sécurité, coût, délai, interfaces). Ces modifications ont été aussi bien à l'initiative du groupement (optimisations, résolution de difficultés techniques) que de RFF : intégration de contraintes liées à la validation des dossiers réglementaires (type DPS), besoins complémentaires ou modificatifs exprimés par les autres acteurs du projet du fait de l'avancement parallèle de leur conception (Équipements EF, exploitation, ...).

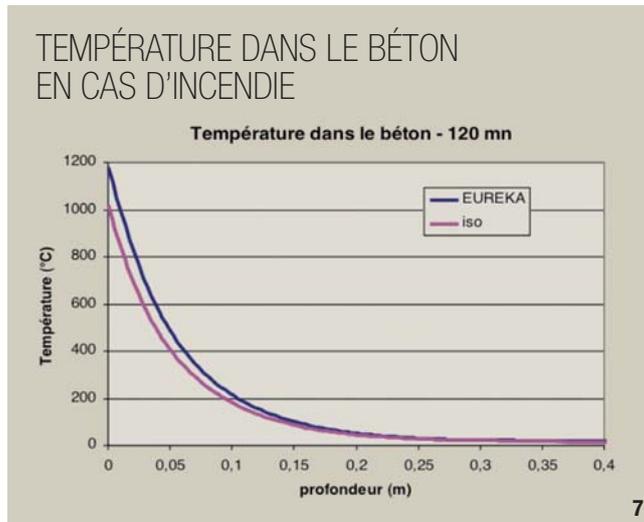
TRACÉ

Le tracé retenu est celui correspondant au tunnel bi-tube. Le tunnel s'inscrit dans une large courbe-contre-courbe (rayon minimum de 5 900 m), selon un profil descendant quasiment constant entre la tête Lorraine et la tête Alsace (figure 4). La pente moyenne en tunnel est de 20 mm/m, pour les deux tubes. La longueur du tunnel est légèrement supérieure à 4 000 m : Cette longueur a été fixée dans le programme, en lien avec la concertation pour l'intégration des têtes notamment.

COUPE EN TRAVERS TYPE

La coupe en travers type retenue s'inscrit dans un rayon intérieur de 4,45 m, y compris une tolérance périphérique de 10 cm (figure 5). Cette coupe a permis l'intégration des contraintes suivantes :

- Contour de référence des obstacles bas et haut en tunnel, selon les différents dévers (IN 0168) ;
- Épaisseur de ballast minimal en tunnel (selon IN 3278) ;
- Exigences pour l'évacuation des personnes et pour la maintenance (selon ITI, STI et contraintes particulières) ;
- Exigences pour les équipements ferroviaires (gabarit électrique, besoins spécifiques pour équipements et chemins de câbles) ;



7- Température dans le béton en cas d'incendie.

8- Outils de coupe.

7- Temperature in the concrete in case of fire.

8- Cutting tools.

→ Dimensionnement aérodynamique (sécurité et confort tympanique) pour la vitesse commerciale de 320 km/h, basé sur l'exigence de section utile de 52 m² fixée au programme ;

→ Passage et implantation des équipements de sécurité (multitubulaires, conduite incendie, ...) ;

→ Contraintes ponctuelles (équipements tendeurs, nourrices incendies, ...).



8 LGV EST - GROUPEMENT LOT 47 - JEAN-MARC BANNWARTH

INTERTUBES

Des intertubes sont prévus tous les 500 m conformément à la STI SRT. La longueur du tunnel excédant légèrement 4 000 m, la distance entre les intertubes d'extrémités et l'air libre est très légèrement supérieure aux 500 m, ce qui a fait l'objet d'une demande de dérogation instruite par le MOA auprès des services de l'État.

Sur les 7 intertubes nécessaires, les pairs (2, 4 et 6) abritent des locaux techniques, espacés de 1 000 m en tunnel (locaux techniques HT, BT et équipements ferroviaires). Dans les intertubes impairs (1, 3, 5 et 7) on prévoit uniquement des équipements GSM et le dispositif de protection anti-bélier de la conduite incendie (figure 6).

Le dimensionnement des intertubes reprend les exigences de gabarit d'évacuation fixées par la STI et l'ITI 98-300 ainsi que les besoins de surface associés aux équipements à implanter.

INTÉGRATION DES ÉQUIPEMENTS FERROVIAIRES

Dès la phase offre, des échanges avec le pilote des lots Équipements Ferroviaires ont permis d'intégrer dans le programme la plupart des besoins exprimés pour ces lots (essentiellement voie, alimentation-traction, télécommunications, signalisation). Il s'est agit principalement :

- De fournir les espaces nécessaires aux équipements EF en tunnel (locaux EF dédiés, niches GSM-R) ;
 - De prévoir les cheminements continus en tunnel dédiés aux EF (caniveau et multitubulaire) ;
 - D'intégrer les contraintes de libération du gabarit électrique (caténaire, feeder et CdPa associés) ;
 - De prévoir les besoins spécifiques de fourreaux au droit des équipements projetés ;
 - De fournir les alimentations nécessaires aux équipements EF.
- Tout au long de la conception, les interfaces avec les équipements ferroviaires ont fait l'objet d'un suivi rapproché par le biais de réunions d'interfaces, maintenues en phase travaux, afin de suivre les évolutions inévitables sur ces sujets.

ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ

Les équipements de sécurité du tunnel à charge du lot 47 sont :

- Équipements HT/BT (cellules HT, transfos, TGBT, coffrets servitudes, onduleurs) ;
- Éclairage de sécurité de maintenance et de balisage (tunnel, intertubes, locaux techniques) ;



© LGV EST - GROUPEMENT LOT 47 - JEAN-MARC BANNWARTH

- Coffrets Généphone et prises pompier ;
- Réseau de défense incendie (réservoir, conduite en charge, surpresseurs,...) ;
- Système de détection incendie ;
- Ventilation des locaux techniques et ventilation de surpression des intertubes ;
- Réseau de communication INPT ;
- Métallerie : main courante, portes des intertubes, anneaux de rappel et relevage,... ;
- GTC permettant de superviser ces équipements.

La conception de ces équipements a fait l'objet lors de la phase Projet d'une analyse FMDS (Fiabilité Maintenabilité Disponibilité Sécurité) ayant permis de confirmer la pertinence de l'architecture des systèmes et équipements projetés vis-à-vis des objectifs et contraintes du projet.

DIMENSIONNEMENT DES ÉLÉMENTS PRINCIPAUX REVÊTEMENT

Les calculs effectués en phase offre ont été menés en considération :

- De deux familles de grès attendus sur le tracé ;
- D'une charge hydrostatique de 4 bars.

Ils ont conduit à retenir des voussoirs 40 cm d'épaisseur, dimensionnement confirmé par la suite en phase de développement du projet, notamment par les justifications complémentaires suivantes :

- Dimensionnement en flexion composée/cisaillement pour prendre en compte l'action du poids de dièdres instables dans la configuration grès sains ;
- Justification des revêtements dans les zones de failles : analyse de la fracturation locale du massif dans ces zones permettant de déterminer l'épaisseur d'une couche pesante de

9- Installations du chantier tête Est.

9- Installations of the eastern portal construction site.

- grès fracturé appliquée sur l'anneau (effet silo) et ce avec ou sans présence de lentille sableuse ;
- Étude de sensibilité des paramètres les plus influents : charge hydrostatique, degré de fracturation du grès « sain » avec une surcharge variable due à la prise en compte d'une partie des contraintes géostatiques, épaisseur des zones fracturées autour des failles appuyant sur le revêtement ;
- Étude particulière au niveau de la zone du Langhtal au sein de laquelle les caractéristiques mécaniques sont réduites sur une zone étendue (effet silos jugé moins important que pour les autres failles sur le tracé) ;
- Justification des revêtements dans les terrains marmo-calcaires de la tête Est (sous couverture d'environ 20 m).

TENUE AU FEU

Conformément aux exigences du programme, les ouvrages suivants ont été vérifiés au feu :

- Anneaux de voussoirs sous feu ISO834 2 h et EUREKA ;
 - Cloisons de séparation du tube ferroviaire et des rameaux de communication avec un objectif de limiter la température de la face non chauffée à 60°C sous feu HCM 120 ;
- Ces calculs, basés sur des vérifications de niveau G2/G3 pour les calculs de la tenue au feu des voussoirs, intégrent la prise en compte d'un écaillage forfaitaire de 5 cm.
- Les calculs ont été menés suivant :
- Les recommandations du guide du

QUELQUES DATES CLÉS

- 1^{er} OCTOBRE 2010** : Ordre de service ;
- FÉVRIER 2011** : Début des travaux préparatoires ;
- AOÛT 2011** : Arrivée des éléments du tunnelier sur site pour montage ;
- OCTOBRE 2012** : Début du creusement du premier tube ;
- NOVEMBRE 2012** : Début de creusement du deuxième tube ;
- FÉVRIER 2014** : Libération du 1^{er} tube pour les marchés d'équipements ferroviaires ;
- JUILLET 2014** : Fin des travaux en tunnel y compris équipements de sécurité.

UNE COLLABORATION EFFICACE

Une collaboration étroite et efficace des différents intervenants permet sur la période écoulée de respecter tous les enjeux importants de qualité et de délai.

À fin décembre 2012, les travaux à l'air libre sont quasiment achevés. Le tube voie 2 dont le creusement a commencé avec 2 mois d'avance sur le planning prévisionnel bat tous les records d'avancement ; 1 040 ml creusés sur les 30 jours du mois de novembre 2012.

Une prochaine parution retranscrira le bilan de la réalisation de ces travaux exceptionnels.



12

© LGV EST - GROUPEMENT LOT 47 - JEAN-MARC BANNWARTH

Côté Lorrain, la sortie du tunnelier s'effectue dans les formations gréseuses saines et compactes. Le tympan gréseux est stable, un renforcement des formations superficielles par clouage a été réalisé en tête de paroi.

Du point de vue hydrogéologique, des nappes perchées sont identifiées en partie sommitale du massif ; aucune d'entre elles n'a été reconnue lors du creusement.

L'EXCAVATION DU TUNNEL DE SAVERNE

CHOIX DE LA MÉTHODE DE CREUSEMENT

Lors de la phase d'Appel d'Offre, Dodin Campenon Bernard et Spie batignolles TPCI, les entreprises du Groupement en charge du tunnel ont, avec l'aide des ingénieries intégrées BG et Antéa, étudié les diverses solutions autorisées : monotube ou bitube, excavation traditionnelle (explosif ou machine d'attaque ponctuelle) ou au tunnelier.

La solution monotube conduisait à une machine de 14,50 mètres de diamètre donc de très grand diamètre. Cette machine posait de nombreux problèmes :

→ Un recul du portail d'entrée qui se trouvait alors dans la zone de la faille de la plaine d'Alsace et avec une grande hauteur de paroi à soutenir (plus de 25 m) ;

→ Le passage de la zone centrale du vallon de Langthall dans laquelle les sondages de reconnaissance avaient identifié des poches de sable et des nappes suspendues éventuellement sous pression ;

→ La nécessité de séparer physique-

ment les deux voies ferroviaires par un mur coupe-feu HCM120 sur toute la hauteur du tunnel et de créer des sas permettant le passage des voyageurs d'un tube à l'autre en toute sécurité et sans transmission du feu.

Ces difficultés, sans réel bénéfice de coût (machine et revêtement beaucoup plus chers) ni de délai (avancement moins rapide et délai supplémentaire

12- Arrière du tunnelier dans le tube V1.

12- Rear of the TBM in tube V1.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

CARACTÉRISTIQUES DU TUNNELIER

- **Machine bi-mode : mode ouvert et EPB**
- **Diamètre d'excavation : 10,07 m**
- **Bouclier simple non articulé de 10,02 m de diamètre**
- **Roue de coupe articulée portant des mollettes de 19 pouces : 50 mollettes simples et 4 doubles**
- **Poussée maximale : 74 250 kN produite par 30 vérins de 2,80 m de course**
- **Couple maximum : 23 000 kNm**
- **Entrainement hydraulique**
- **Vitesse de rotation de la roue de coupe : de 0,5 à 4 t/mn**
- **Puissance installée sur la machine : 5 850 kW**
- **Convoyeurs : capacité 1 000 m³/h, largeur 1,00 m**
- **Poids du bouclier : 1 000 t**
- **Poids de la roue de coupe : 180 t**
- **Poids total : 2 100 t**

CARACTÉRISTIQUES DES VOUSOIRS

- **Voussoirs universels de 7 éléments + 1 clé**
- **Nombre de voussoirs : 30 880 unités**
- **Diamètre extérieur du revêtement béton : 9,70 m**
- **Diamètre intérieur du revêtement béton : 8,90 m**
- **Épaisseur des voussoirs : 0,40 m**
- **Longueur de l'anneau : 2 m**
- **Béton : C40/50 dosé à 350 kg/m³ de ciment CEM III PM-ES**

pour la réalisation du mur coupe-feu central), ont conduit le Groupement à abandonner cette solution.

Les diverses méthodes d'excavation ont également été explorées dans cette phase. La méthode d'excavation à l'explosif ou avec des machines d'attaque ponctuelle envisageable compte tenu de la dureté du grès présentait des aléas importants sur le revêtement provisoire principalement dans la zone centrale du Vallon de Langthall. Suivant les hypothèses de sol considérées, ce revêtement pouvait être lourd et générerait donc un aléa conséquent. Le planning imposait 4 attaques d'où une mobilisation importante de moyens humains et matériels. Toutes ces raisons ont conduit le Groupement à opter pour une excavation du bitube au tunnelier.

CHOIX ET CONCEPTION DU TUNNELIER

La géologie rencontrée a dicté le choix du tunnelier. La quasi-totalité du tracé (90% des 3 860 m) des deux tunnels se fait dans le grès rose de Vosges ou les Poudingues de Sainte Odile. Ces matériaux sont de faible dureté mais sont compacts et très abrasifs. Ces formations conduisaient de manière évidente à une excavation en mode ouvert avec extraction des matériaux par tapis dès la chambre d'abatage.

Il restait donc à trouver la meilleure solution pour franchir les formations marno-calcaire instables de l'entrée côté Alsace (50 mètres minimum) et la zone du Vallon de Langthall (350 mètres). Après avoir étudié diverses solutions de traitement du

massif par injection (depuis l'extérieur ou depuis la machine) ou même un près tunnel en méthode traditionnelle, le Groupement a pensé que le plus fiable et le plus sûr serait d'avoir un tunnelier adapté à ces types de terrains c'est-à-dire une machine fonctionnant également en pression de terre. D'où la machine bi-mode proposée lors de l'Appel d'Offre et utilisée sur le projet.

LE TUNNELIER

En commençant l'excavation un an après l'Ordre de Service, un seul tunnelier permettait de respecter les délais globaux du projet. Afin de tenir cette date, le Groupement a anticipé le choix du fabricant du tunnelier et a choisi, dès l'Ordre de Service le 1^{er} octobre 2010, la société HERRENKNECHT. La conception a été faite par le fabricant en collaboration avec les spécialistes de DCB et SBTPCI en 3 mois et sa fabrication en 6 mois. La machine a été livrée sur le site à partir du 16 juillet. Le montage a commencé en août pour une mise à front faite début novembre 2011.

La machine a été conçue en fonction des terrains rencontrés (pression de terre et mode ouvert) et des objectifs d'avancement instantané de 80 mm/mn en mode ouvert et de 40 mm/mn en pression de terre (maxi 3 bars). Ces cadences permettent les avancements moyens journaliers de 20 m (mode ouvert) et 15 m (EPB) prévus au planning des travaux.

Une attention particulière a été portée sur le remplissage en mortier de bourrage derrière les voussoirs. Compte-tenu de l'existence de circulation d'eau éventuellement sous pression dans le massif et du choix d'utiliser un mortier semi-inerte (dosage à 60 kg/m³ en zone courante et à 140 kg/m dans les



13

© LGV EST - GROUPEMENT LOT 47 - JEAN-MARC BANNWARTH

13- Transfert de la tête de coupe dans le tube V1 achevé.

13- Transfer of the cutting head in completed tube V1.

zones d'entrée et sortie), il existait, en mode ouvert, le risque de lessivage du mortier ou de perte vers l'avant de la machine. Dans la conception de l'injection du mortier et du revêtement du tunnel, il a donc été prévu :

→ Un surdimensionnement des pompes d'injection (3 pompes KSP20) et de la trémie de stockage sur le tunnelier (16 m³) ;

→ La possibilité d'une injection à travers les voussoirs avec ajout éventuel d'adjuvants accélérateur de prise ;

→ La possibilité avec la mise en place de bi-cônes d'avoir des zones non complètement remplies ;

→ La possibilité d'une injection complémentaire à l'arrière du train suiveur (plateforme avec pompe KSP12 et benne de 6 m³).

LE REVÊTEMENT DU TUNNEL

Le revêtement est réalisé par des anneaux universels trapézoïdaux en béton armé constitués chacun de 8 voussoirs préfabriqués. La réalisation des 30 880 pièces a été confiée à la société STRADAL qui a aménagé un carrousel de fabrication dans son usine de KILSETT (67) située à 45 km du chantier. Le carrousel est équipé de 40 moules (5 anneaux complets) fournis par CBE et il permet une production journalière, en 3 postes, de 12 anneaux.

Les voussoirs sont approvisionnés sur le chantier par camions portant chacun un ½ anneau.

Les voussoirs ainsi que le mortier de bourrage sont ensuite acheminés jusqu'au tunnelier par des véhicules spéciaux double cabines sur pneu de charge utile 86 t (soit le transport d'un anneau complet et de 12 m³ de mortier correspond à cet anneau).

À la pose, les voussoirs sont assemblés dans les 2 directions par des boulons provisoire (Vis 25*250/160). Dans les zones particulières d'entrée et sortie, de faille ainsi qu'au droit des inter-tubes, le boulonnage est définitif et complété par des bi-cônes de résistance au cisaillement 15 t ou 37,5 t (15 unités par section) qui assurent une liaison mécanique entre les anneaux. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

LINÉAIRE TOTAL CREUSÉ EN TUNNEL : 7 720 m

LINÉAIRE TOTAL CREUSÉ EN RAMEAU : 140 m

DÉBLAIS RÉALISÉS : 615 000 m³

NOMBRE D'ANNEAUX : 3 889 u

NOMBRE DE VOUSSOIRS : 30 880 u

VOLUME DE BÉTON DE VOUSSOIRS : 97 000 m³

VOLUME DU SOUBASSEMENT GRÈS TRAITÉ : 12 800 m³

VOLUME SOUBASSEMENT BÉTON : 9 050 m³

VOLUME DE BÉTON DE TROTTOIRS : 23 115 m³

LINÉAIRE DE FAUX-TUNNEL : 165 m

VOLUME DE BÉTON DES FAUX-TUNNEL : 5 600 m³

SONDAGES DE RECONNAISSANCES : 56 u

ABSTRACT

EAST EUROPEAN HIGH-SPEED TRAIN LINE, SAVERNE TUNNEL

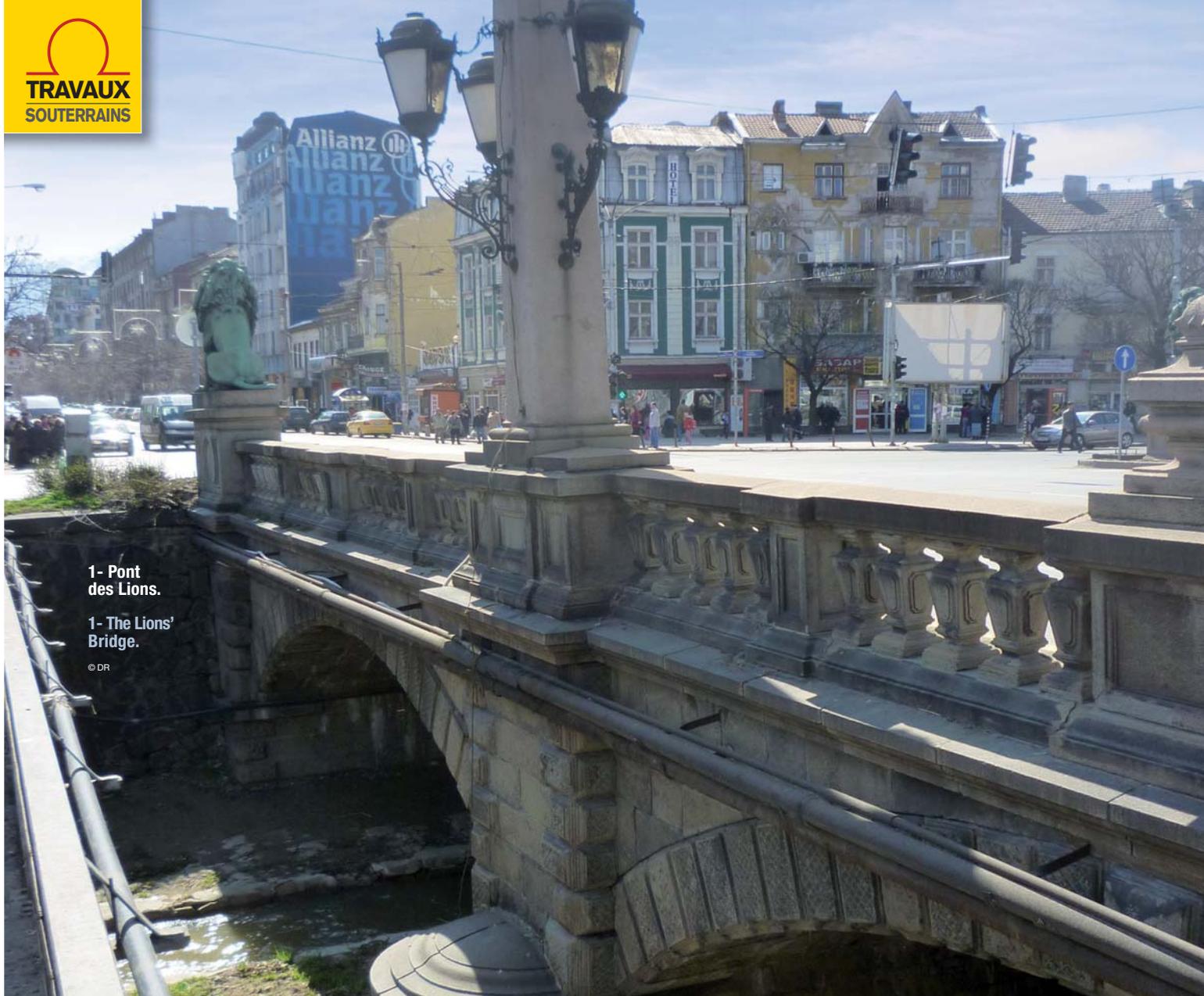
A. CUCCARONI, RFF - N. ZEHANI, RFF - A. LACROIX, SPIE BATIGNOLLES TPCI - P. BOUVATIER - J. SOUSA, SETEC - P. LEGRAND, TERRASOL

Saverne Tunnel, an emblematic structure of the second phase of the East European High-Speed Train Line, is included in work package 47, for which work was launched on a Design and Build basis. Driven into the rock mass of the northern Vosges mountains, it consists of two tubes, one for each track, over a length of slightly more than 4 km. These structures are joined together by cross-passages spaced every 500 metres. The ministerial technical instruction No. 98-300 relating to safety in rail tunnels and the «safety in rail tunnels» STI were fully taken into account as of the tunnel design stage. The geological context and the stringent performance deadline constraint led the consortium to opt for double-tube excavation by TBM. □

LAV (LÍNEA ALTA VELOCIDAD) ESTE EUROPEA, TÚNEL DE SAVERNE

A. CUCCARONI, RFF - N. ZEHANI, RFF - A. LACROIX, SPIE BATIGNOLLES TPCI - P. BOUVATIER - J. SOUSA, SETEC - P. LEGRAND, TERRASO

El túnel de Saverne, estructura emblemática de la segunda fase de la Línea de Alta Velocidad Este Europea, está integrado en el lote 47, cuyas obras están en fase de diseño-realización. Excavado en el macizo de los Vosgos del Norte, consta de dos tubos, un carril por tubo, en una longitud de un poco más de 4 km. Estas estructuras están unidas entre sí por galerías de unión espaciadas cada 500 m. Desde el diseño de la estructura, se han tenido en cuenta, en su totalidad, tanto la instrucción técnica ministerial n° 98-300, relativa a la seguridad en los túneles ferroviarios, como la Especificación Técnica de Interoperabilidad "seguridad en los túneles ferroviarios". El contexto geológico y el limitado plazo de ejecución llevaron al grupo a optar por la utilización de una tuneladora para la excavación del bitubo. □



1- Pont
des Lions.

1- The Lions'
Bridge.

© DR

PASSAGE SOUS LE PONT DES LIONS À SOFIA

AUTEURS : MARTINO SEMERARO, SYSTRA FRANCE - BERNARD MERCIER, SYSTRA FRANCE - NICOLA DELLA VALLE, TUNNEL CONSULT SPAIN - ELENA CHIRIOTTI, SYSTRA FRANCE

LE LAVOV MOST (PONT DES LIONS) EST UN OUVRAGE HISTORIQUE EN MAÇONNERIE SOUS LEQUEL PASSE LA LIGNE 2 DU MÉTRO LONGITUDINALEMENT. LE TUBE DE 9,43 m DE DIAMÈTRE EST FORÉ DANS DES SOLS MOUS AVEC UN TUNNELIER À PRESSION DE TERRE, SOUS TRÈS FAIBLE COUVERTURE, AU RAS DES FONDATIONS DU PONT. UNE ANALYSE DE RISQUES ET D'IMPORTANTES PRÉCAUTIONS ONT ÉTÉ PRISES, GRÂCE AUXQUELLES LES TASSEMENTS OBSERVÉS N'ONT PAS DÉPASSÉ QUELQUES MILLIMÈTRES.

INTRODUCTION

Pour répondre à la croissance démographique et à l'augmentation du trafic dans la ville de Sofia, une deuxième ligne de Métro est en cours de construction (figure 2).

La ligne 2 orientée du nord au sud de 9,4 km de longueur comporte 11 stations découpée en deux tronçons : le premier tronçon Obelya - Nadezhda, (3 km et 4 stations) au sol dans la banlieue Nord-Ouest de la ville; le deu-

xième tronçon Nadezhda - Cherni Vrah (6,4 km et 7 stations) entièrement en tunnel sous le cœur de la ville.

Les autorités Bulgares ont passé un contrat avec le groupement SIM composé de SYSTRA, du partenaire Bul-

gare INFRAPROJECT et de l'espagnol METROCONSULT pour la supervision des travaux des Lots 1 et 2 du deuxième tronçon. L'article fait référence en particulier au Lot 1, qui démarre au Nord-Ouest de la ville et fini au centre

de celle-ci juste avant la station MC-9 et nécessite la construction de 3,8 km de tunnel foré et 3 stations (MS-5, MS-6 et MS-7). Le tunnel d'un diamètre de 9,43 m est excavé au Tunnelier en mode « pression de terre » ou EPB dans des sols mous (figure 3). Le diamètre intérieur est de 8,43 m et le revêtement en voussoirs préfabriqués a une épaisseur de 0,32 m. Le contrat de conception-réalisation pour le Lot 1 a été attribué à l'entreprise DOGUS, et TUNNELCONSULT pour la conception. Plusieurs points difficiles ont été rencontrés le long du tracé du tunnel tel que l'utilisation d'un tunnelier avec une couverture peu profonde sous des voies ferrées proche de la jupe du tunnelier, et à l'intersection avec la ligne 1 du Métro. Cependant, la section la plus sensible a été l'excavation du tunnel sous le Lavov Most (Pont des Lions), un pont voûte en maçonnerie historique construit à la fin du 19^e siècle et franchissant la rivière Vladaiska.

Dans cette section, la couverture moyenne est de 3,5 m et le profil vertical du tunnel est très proche des fondations du pont. La complexité de l'excavation sous le pont est augmentée par la courte distance (i.e., environ 18 m) depuis le démarrage du tunnelier dans la station MC-7. L'article décrit le principe suivi pour préparer et réaliser l'excavation de cette section sensible.

DESCRIPTION DU PONT

Le pont voûte est constitué de deux arches de 11,70 m chacune en maçonnerie de pierres granitiques (figure 1). Le pont a une longueur d'environ 22,5 m et une largeur de 20,5 m. Les fondations sont des massifs constitués de barrettes en bois de 3,5 m de long et 2,8 m de hauteur, remplis de gros blocs de pierre. Les massifs sur les culées Nord et Sud ont une largeur de 1,5 m alors que le massif de fondation sous la pile centrale est de 2 m de largeur.

La distance moyenne entre la voûte du tunnel et la fondation est de 0,90 m, alors que les pieux en bois sont à seulement 0,20 m du revêtement du tunnel (figure 4).

Les dimensions dans le plan horizontal doivent être conçues pour ne pas endommager le pont existant. Le tunnel est presque parallèle à l'axe longitudinal de l'ouvrage, le biais entre l'axe de l'ouvrage et l'axe du tunnel est de 12° environ. Une première inspection visuelle du pont a mis en évidence de petites fissures qui ont pu être occasionnées par des légers mouvements



2- Vue générale de la ville de Sofia et tracé de la 2^e ligne de Métro en vert.
3- Tunnelier Herrenknecht à pression de terre.

2- General view of the city of Sofia and route of the second metro line in green.

3- Herrenknecht earth pressure balance TBM.



du pont dans le passé. Les fissures existantes ne doivent pas être réactivées par l'action du tunnelier et des mesures compensatoires doivent être conçues afin de protéger le pont.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Les investigations géotechniques initiale et complémentaire au droit du Pont des Lions ont permis de caractériser le sol de façon détaillée. Les différentes couches géotechniques sont les suivantes :

→ Depuis le Terrain Naturel (537,4 m a.s.l.) jusqu'à la cote 532,3 m : remblai

de sables et graviers, terreau et argiles limoneuses (Unité 1 selon le profil géotechnique), soit 5 m environ.

→ Depuis le niveau 532,3 m a.s.l. jusqu'à la cote 528,3 m : dépôt quaternaire (Unité 3 selon le profil géotechnique) constitué de gravier fin et moyen, galets et limon-sableux. La frontière inférieure de l'Unité 3 est située 4,5 m sous le lit de la rivière. La perméabilité du sol est d'environ 8×10^{-5} m/s.

→ À partir de la cote 528,3 m : dépôts Pliocène (Unité 7 selon le profil géotechnique) constitué d'argiles limoneuses de haute plasticité avec une forte teneur en eau. La perméabilité varie entre 2×10^{-6} m/s et 1×10^{-9} m/s. Les fondations du pont des Lions sont situées dans l'Unité 3 (gravier et galets), alors que sous l'ouvrage le tunnel est excavé principalement à travers l'Unité 7 (argiles limoneuses) avec le sommet de la voûte du tunnel dans l'Unité 3, ce qui constitue la couverture de 3,5 m du tunnel. Le niveau d'eau est situé à environ 531,5 m a.s.l.

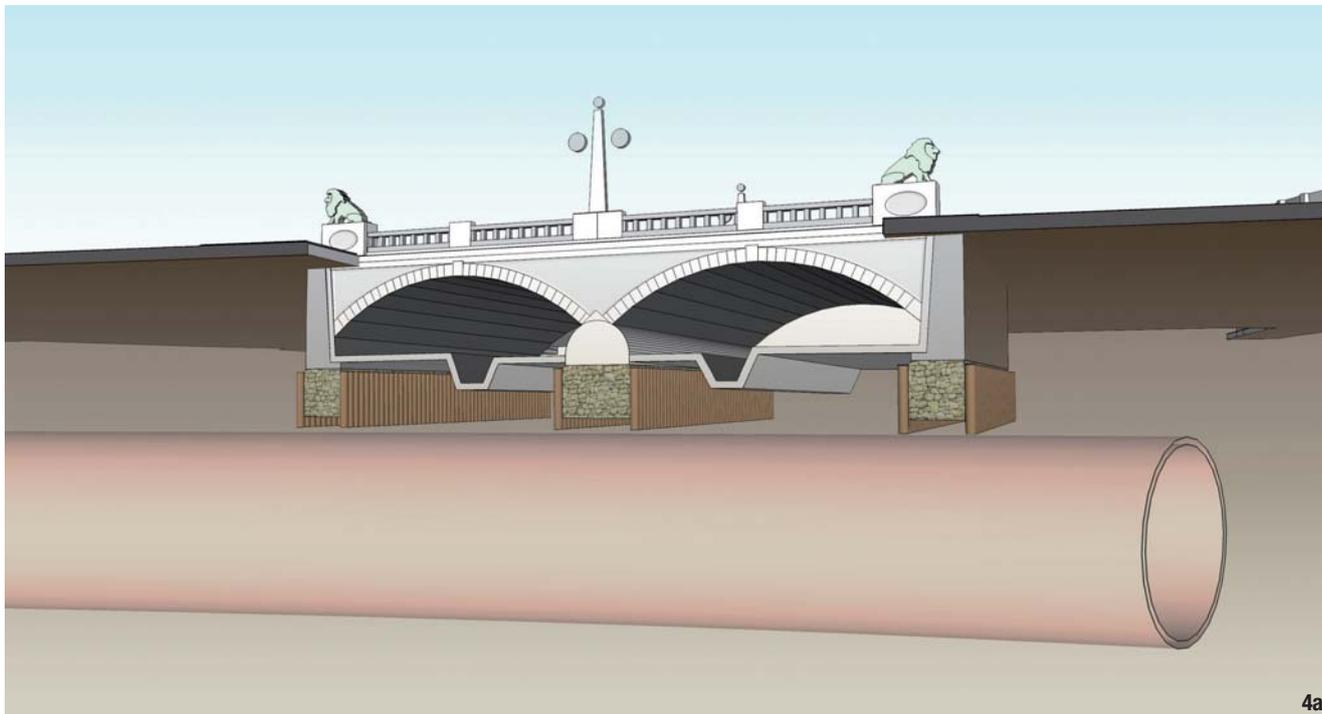
Pendant la campagne d'investigation géotechnique, trois forages de 30 m de profondeur ont été réalisés, un près de chacune des culées du Pont et le troisième dans le lit de la rivière. Afin de mieux examiner les fondations de l'ouvrage et confirmer les hypothèses initiales, trois forages inclinés supplémentaires ont été réalisés. Forage BH1 (7,5 m de profondeur) et BH2 (15 m de profondeur) ont été fait au droit de la fondation sud et le forage BH3 (15 m de profondeur) a été fait derrière la culée nord.

Les investigations supplémentaires menées dans la zone du pont ont confirmé le principe et la profondeur des fondations, et ont montré que les fondations sont structurellement indépendantes du tablier de l'ouvrage.

PRÉVISION DES TASSEMENTS INDUITS PAR LE TUNNELIER

Des analyses numériques ont été réalisées par le Concepteur afin d'étudier la répartition des tassements induits par le tunnelier prenant en compte l'option « ne rien faire » (Modèle A) et l'option de traiter les dépôts Quaternaire de l'Unité 3 sur la hauteur totale de la couverture du tunnel, i.e., 3,5 m (Modèle B). Des modèles 3D par éléments finis ont été réalisés à l'aide du programme PLAXIS 3D.

Les modèles numériques (figure 5) ont été conçus pour simuler l'excavation des 40 premiers anneaux quand le tunnelier démarre l'excavation à la station MC-7.



4a

Le modèle simule l'avancement réel de l'excavation du tunnel, avec des passes de 1,5 m de longueur, en appliquant la pression de terre réel de travail au front de l'excavation (0,5 bars en clé de tunnel avec un gradient de +0,14 bar/m vers le radier).

La forme conique du bouclier du tunnelier et la présence du revêtement installé à l'arrière du bouclier sont pris en compte, ainsi que l'injection du vide annulaire. Du fait des limites du modèle, le tracé du tunnel a été modélisé parallèlement à l'axe du pont avec une distance entre les deux axes correspondant à la distance entre le pont et le revêtement à la culée nord (condition la plus critique).

Le modèle de sol durcissant (hardening soil model) a été utilisé comme loi de comportement du sol.

Les caractéristiques du traitement de sol dans l'Unité 3 ont été imposées en termes d'augmentation de la cohésion (i.e., de 0 à 300 kPa) et d'augmentation du module de déformation (i.e., de 26 à 300 MPa).

Les résultats du Modèle A ont donné un tassement maximum d'environ 8 mm et une variation angulaire d'environ 1/1000.

De plus, la perte de volume enregistrée de 0,23% était proche de celle prévue pour une excavation à pression de terre sous conditions contrôlées, et confirmait la pertinence des pressions de confinement proposées.



4b

Cependant, cette situation idéale peut être facilement perturbée compte tenu de la faible couverture du tunnel, les conditions de sol caractérisées par un sol granulaire à la clé du tunnelier et la précision en maintenant la pression modélisée pendant l'excavation avec une machine à pression de terre ($\pm 0,2$ bar). Une chute de pression soudaine et localisée aurait été inacceptable pour le projet, comme l'ont montré les

**4a & 4b-
Vision 3D
du passage
du tunnel
sous le Pont
des Lions.**

**4a & 4b-
3D view of
the tunnel's
passage under
Lions' Bridge.**

analyses numériques additionnelles. Le modèle B a montré que le risque d'une perte soudaine de pression peut être compensé de façon raisonnable en traitant le gravier de l'Unité 3 sous les fondations du pont (tassement limité à 3-4 mm et déviation angulaire de 1/3500).

Le traitement de sol a été ensuite modélisé pour obtenir les caractéristiques requises du sol traité.

ANALYSE DE RISQUE ET MESURES COMPENSATOIRES

La solution technique proposée par l'Entreprise pour le lancement du tunnelier et le passage du tunnelier sous le Pont des Lions (figure 6) a été optimisée au moyen d'une procédure d'analyse de risque dans laquelle tous les acteurs impliqués ont participé.

Le traitement de sol comprend une consolidation préliminaire des fondations du pont à l'aide d'injections au coulis de ciment dans des forages inclinés, avec des tubes à manchettes de 5 m de long. Les tubes ont été laissés en place jusqu'au passage du tunnelier, dans le but éventuel de réaliser des injections supplémentaires pour le cas où des mouvements excessifs soient apparus pendant l'excavation du tunnel. L'Unité 3 (selon le profil géotechnique) a ensuite été traitée par injection d'imprégnation, avec faible pression d'injection (entre 1 et 2 bars) afin d'éviter le phénomène de « claquage ». En considérant la répartition de la taille des grains du sol à traiter, un ciment avec perméabilité

à l'air élevée (environ 9000 cm²/g) a été choisi pour l'efficacité du traitement. Deux murs limites de 5 m de profondeur ont été réalisés à l'amont et à l'aval du pont afin de constituer une aire délimitée dans laquelle le coulis est confiné. Le principe d'injection consiste en des

trous d'injection de 4 m de longueur espacés de 1 m et disposés en quinconce. Les injections de ciment ont été réalisées par la méthode « de bas en haut », sans tubes à manchettes. Une surface de 580 m² a été traitée à l'aide de 283 tonnes de coulis.

Les mesures compensatoires additionnelles suivantes ont été mises en œuvre :

- Interruption du trafic sur l'ouvrage pendant l'entrée du tunnelier dans la section ;
- Déviation de l'eau dans des buses métalliques ;
- Installation d'un étaieement temporaire sous les arches du pont afin de supporter le tablier du pont en cas de tassements excessifs ;
- Bétonnage de la dalle en BA de 0,5 m d'épaisseur sur le lit de la rivière avant le renforcement de sol ; cet élément a un double rôle : offrir une plateforme de travail plane pour les injections du sol et limiter les mouvements horizontaux du pont pendant l'excavation du tunnel ;

→ Plateforme de forage/injection en attente sur le chantier ;

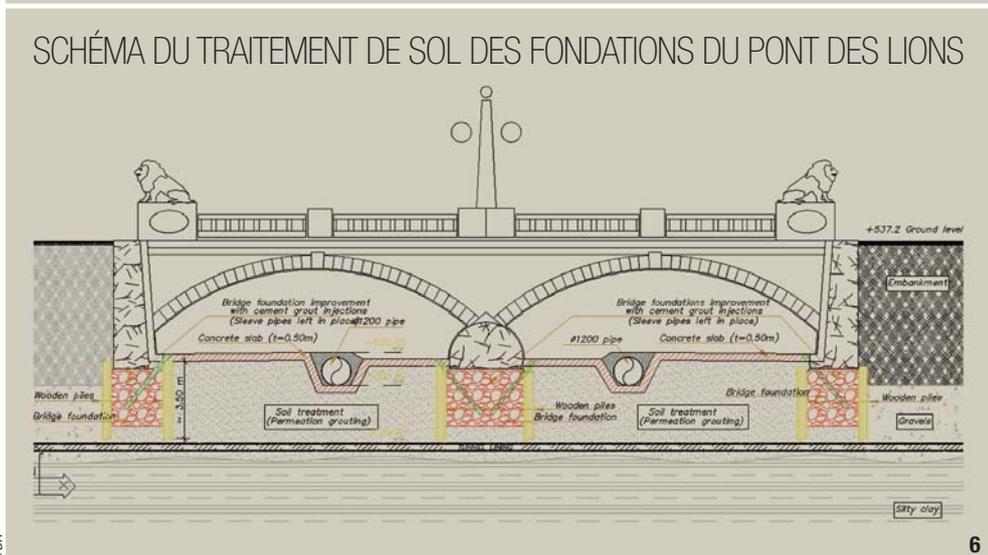
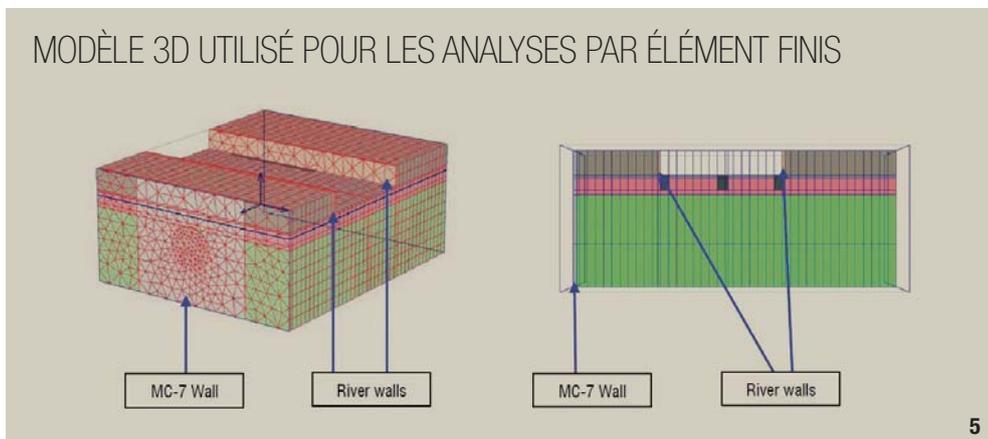
→ Mise en œuvre d'un système de suivi adapté, associé à l'interprétation des paramètres clés des opérations pendant la rentrée du tunnelier.

Une procédure a été mise au point pour analyser les principaux risques liés à l'excavation sous le pont : évaluation du risque initial, identification des mesures compensatoires requises et des mesures d'urgence afin de contrôler le risque résiduel. L'évaluation du risque a été prolongée jusqu'à la section de sortie dans la station MC-7, du fait de sa proximité par rapport au pont. L'enseignement acquis pendant la sortie du tunnelier dans les premières stations a permis d'améliorer le lancement du tunnelier en Station MC-7 et de bien définir les procédures de guidage pour l'excavation sous le pont. Avant d'excaver sous le pont, des essais de perméabilité à l'intérieur et à l'extérieur de la zone traitée ont été réalisés pour vérifier l'efficacité du traitement de sol, montrant une perméabilité résiduelle du gravier traité de $7,7 \times 10^{-7}$ m/s.

5- Modèle 3D utilisé pour les analyses par élément finis.

6- Schéma du traitement de sol des fondations du Pont des Lions.

5- 3D model used for finite element analyses.
6- Schematic of soil treatment for the foundations of Lions' Bridge.



RÉTRO-ANALYSE DES PERFORMANCES DU TUNNELIER

Un élément très important pour mettre en place et améliorer l'ensemble des mesures de compensation a été le niveau de confiance acquis sur les sections précédemment excavées avec le tunnelier.

Une analyse exacte des paramètres du tunnelier et des résultats de surveillance sur le tronçon compris entre les stations MC-6 à MC-7 (pk 5+507 - 5+990) a été effectuée par l'équipe de supervision. Dans ce tronçon de 480 m de long, le tunnel a été excavé principalement dans des sols granulaires.

En particulier, la pression de support appliquée au front de taille, le poids extrait à chaque passe d'excavation et le volume de coulis longitudinal avec les pressions correspondantes enregistrées pendant l'excavation à pression de terre ont été analysés et comparés avec les valeurs de référence et la fourchette opérationnelle adaptée (figures 7 et 8). Puis, la corrélation entre les paramètres d'excavation et la surface de tassements induite exprimée en termes de « perte de volume » a été prise en compte de façon à évaluer la réponse du sol vis-à-vis de la procédure d'excavation du tunnelier.

Dans le tronçon analysé, un repère de surface a été installé tous les 10 m, en rapport avec l'axe du tunnel, avec un enregistrement quotidien.

7- Pressions de confinement mesurées dans le capteur situé à 0,7 m à l'arrière de la voûte du tunnel, et perte de volume recalculée dans le tronçon MC-6 MC-7.

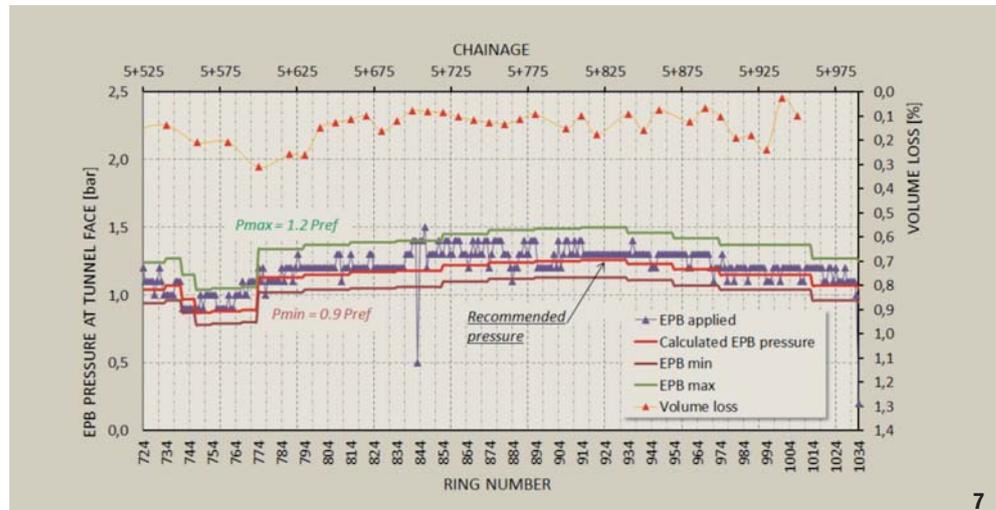
8- Paramètre d'injection vis-à-vis de la perte de volume dans le tronçon MC-6 MC-7.

9- Tassement induit par le tunnelier depuis la Station MC-7 jusqu'au creusement complet sous le pont.

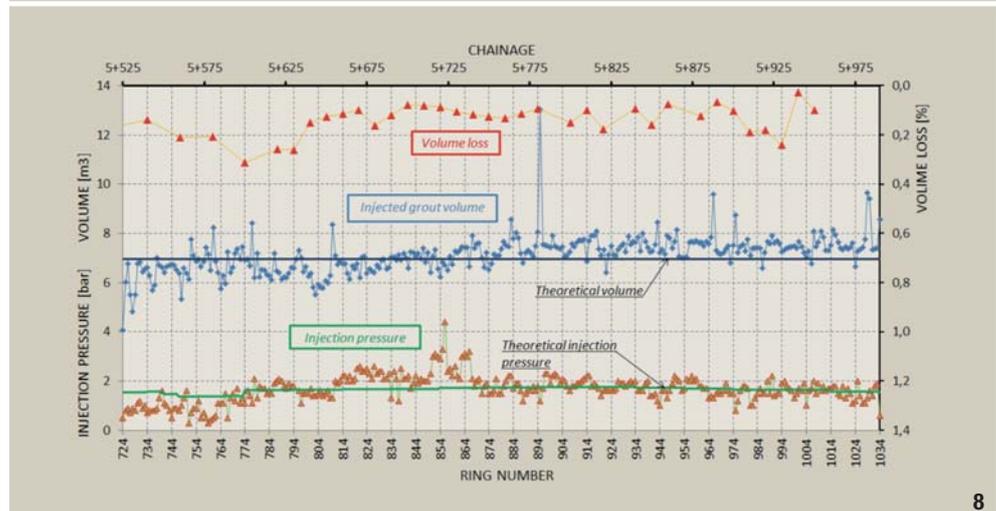
7- Confinement pressions measured in the sensor located 0.7 m behind the tunnel roof, and loss of volume recalculated in the MC-6 MC-7 section.

8- Injection parameters relative to the loss of volume in the MC-6 MC-7 section.

9- Subsidence induced by the TBM - from MC-7 Station through to complete tunnel driving under the bridge.



7



8

De plus, n.14 sections transversales ont été équipés avec 6 points de nivellement à des distances de 5, 10 et 14 m de l'axe du tunnel. La zone située à 50 m en avant et à l'arrière du front de taille a été considérée comme zone active en termes d'influence du tunnelier et cela a été surveillé à une fréquence élevée. Les profils de tassement transversal ont ainsi été enregistrés et relevés.

Par une analyse paramétrique, les courbes théoriques de Gauss décrivant le creux du tassement induit par le tunnelier ont été calés au mieux par rapport aux tassements mesurés et le paramètre sans dimension k de la formulation bien connue de Gauss a été recalculé afin de correspondre au profil de tassement mesuré. Un ajustement satisfaisant a été obtenu pour $k = 0,33$. Ce résultat est en accord avec les valeurs de 0,2-0,3 que l'on trouve dans la littérature technique pour les sols granulaires. Finalement, la perte de volume a été calculée le long

du tronçon analysé et les résultats ont été relevés et comparés avec les paramètres de pression de terre mentionnés ci-dessus.

Le pilotage contrôlé du tunnelier a permis de limiter les tassements à une valeur maximum de 16 mm (tassement moyen < 7 mm) et la perte de volume maximum à environ 0,3% (valeurs moyennes recalculées variant entre 0,1 et 0,2%).

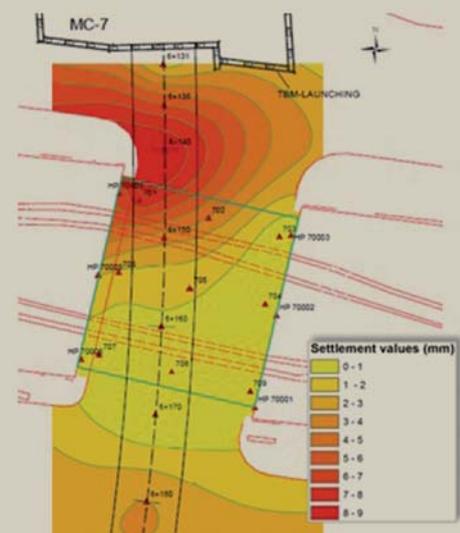
Les valeurs maximum ont été enregistrées dans la section courbe d'apprentissage.

L'analyse a souligné les aspects suivants :

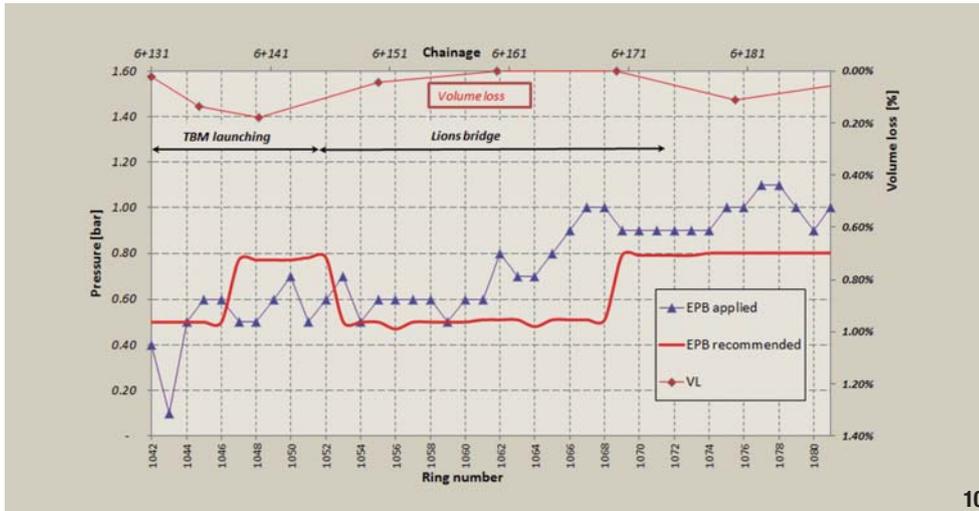
→ Le maintien du poids extrait et de la pression de confinement, dans les gammes opérationnelles prédéfinies, ont été possibles avec un haut niveau de confiance ;

→ Le tassement et la perte de volume ont été strictement corrélés à la pression de confinement appliquée sur le front et à la pression d'injection du vide annulaire et pouvaient être facilement

TASSEMENT INDUIT PAR LE TUNNELIER depuis la Station MC-7 jusqu'au creusement complet sous le pont



9



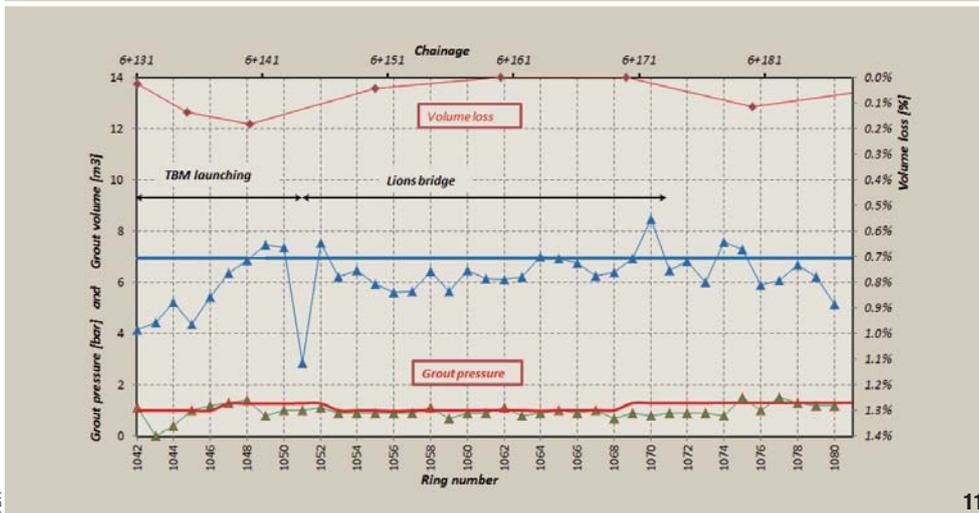
10

10- Pressions de front à la clé vis-à-vis les pertes de volume recalculées pendant le creusement sous le pont.

11- Volume et pressions d'injection du vide annulaire vis-à-vis des pertes de volume pendant le creusement sous le pont.

10- Tunnel face pressure on keystone relative to recalculated losses of volume during tunnel driving under the bridge.

11- Annular space injection volume and pressures relative to losses of volume during tunnel driving under the bridge.



11

gauche de la Culée Nord, et noté quand le tunnelier est émergé du bloc de sol traité pour la sortie dans la station MC-7 (figure 12). Le tassement moyen mesuré au niveau de la rue le long de toute la zone traitée et au niveau des fondations du pont varie entre 1 et 4 mm (figure 9).

Pendant le lancement du tunnelier les pressions de confinement et les paramètres d'injection étaient légèrement plus faibles que les valeurs recommandées, conduisant au tassement maximum mentionné. La procédure de guidage du tunnelier a été rapidement révisée, spécialement en termes de pression appliquée au front, afin de minimiser la perte de volume et le tassement durant le passage sous le pont. Ceci a également été rendu possible grâce à la résistance du sol traité au-dessus de la voûte du tunnel, qui empêchait le soulèvement. Les paramètres d'injection du vide annulaire étaient généralement en accord avec les prescriptions, mais avec des volumes d'injection 15 % inférieur aux valeurs théoriques. Les injections secondaires ont été exécutées directement à travers le voussoir pour traiter n'importe quelle faiblesse résiduelle. La perte de volume maximum recalculée est de 0,18 % (section de lancement).

contrôlés en agissant sur ces deux paramètres clés ;

→ Les anomalies dans les paramètres clés pouvaient être facilement identifiées par un suivi systématique du fonctionnement des performances du tunnelier, et pouvaient être interprété et corrélé aux effets induits à la surface, et les actions correctives pouvaient être mises en œuvre par le biais des procédures du tunnelier existant.

Par exemple, pendant l'excavation de l'anneau 843 une chute de pression soudaine à 0,5 bar a été détectée. Ceci a été expliqué par la présence de lentilles d'argiles limoneuses hautement cohésive et plastique sur le front d'excavation du tunnel, formant des prises dans la chambre d'excavation et des espèces de blocs obstruant la base de la vis sans fin et obstruant la circulation du déblai. En parallèle une augmentation de la vitesse et du couple de rotation a été observée. En raison de la perte provisoire de pression, le vide autour du bouclier a convergé plus que

d'habitude et des pressions d'injection élevées ont dues être appliquées dans les anneaux suivants. La présence de lentilles d'argiles limoneuses dans la zone a réduit l'effet du tassement à la surface.

Les volumes et pressions d'injection du coulis étaient légèrement plus faibles que les valeurs théoriques dans la courbe d'apprentissage. Ensuite, les volumes de coulis sont restés presque constants, et généralement 8 à 10 % plus élevé que le volume du vide annulaire théorique. Un volume de coulis anormal de 12 m³ a été enregistré en assemblant l'anneau 895. Cependant, cette valeur a été mesurée en fin de journée à l'interruption du tunnelier pendant laquelle le système d'injection était nettoyé.

Les capteurs avaient probablement enregistré le flux de l'eau passant dans les conduits et le volume n'était pas représentatif du coulis (aussi les pressions de coulis sont restées proches de valeurs de design).

CREUSEMENT SOUS LE PONT - RÉSULTATS

Un plan de surveillance a été défini pour mesurer les mouvements induits à la surface, sur le pont et ses fondations pendant les opérations de traitement de sol et l'excavation au tunnelier.

Les points de nivellement ont été installés à la surface en correspondance avec la projection de l'axe du tunnel, à un espacement de 10 m, et les sections de surveillance transversales n.3 constituées de 5 points de repère chacune ont été installées au niveau du sol près des culées et de la pile centrale. En plus, 6 points de nivellement ont été installés sur les fondations du pont. Les mesures ont été faites à l'aide de deux théodolites positionnés dans le lit de la rivière et une station de nivellement au niveau de la surface, l'ensemble étant positionné en dehors de la zone d'influence du tunnelier.

Le tassement total mesuré dû au creusement du tunnelier a donné une valeur maximale de 7 mm enregistré sur la



12



13

© DR

CARACTÉRISTIQUES DU TUNNELIER

CONSTRUCTEUR : Herrenknecht
TYPE DE CONFINEMENT : pression de terre
PRESSION MAXI DE CONFINEMENT : 4 bars
DIMENSIONS : Longueur TBM + back-up approximativement 84 m (5 wagons)
POIDS TBM + BACK-UP APPROXIMATIVEMENT : 1 250 t
DIAMÈTRE ROUE DE COUPE : 9,36 m
RAYON DE COURBURE MINIMUM : 200 m
POUSSÉE : thrust force 87 824 kN
ARTICULATION : 2 x 13 vérins, passe d'excavation 2 200 mm
CONVOYEUR À VIS : longueur = 14 700 mm, couple = 202,6 kNm, puissance = 400 kW
ÉRECTEUR : type hydraulique, poids approximatif 60 t

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Métro de Sofia
MAÎTRE D'ŒUVRE GÉNÉRAL ET MAÎTRE D'ŒUVRE CONCEPTION ET VISA : Groupement SIM (SYSTRA, INFRAPROJECT ET METROCONSULT)
GROUPEMENT D'ENTREPRISES :
Lot 1 : DOGUS (3 stations plus partie au tunnelier)
Lot 2 : METROTRACE (2 stations + 900 m de tunnel traditionnel)
Lot 3 : METRO ALLIANCE (station 8 excavée en tunnel traditionnel)
Lot 4 : GEOTECHMIN (station 11)
SOUS-TRAITANT ÉTUDES LOT 1 : TUNNELCONSULT (BE études exécution de DOGUS)
L'article fait référence au seul Lot 1

Ensuite la perte de volume a été progressivement mieux contrôlée atteignant des valeurs négligeables. Après une inspection visuelle du pont réalisée par l'ingénieur responsable de la supervision, le cadre a été enlevé dans la mesure où il n'y a eu aucun désordre structurel et fonctionnel.

CONCLUSIONS

L'article présente l'approche suivie pour le creusement avec un tunnelier à pression de terre de 9,43 m de

12- Tunnelier dans la station MC-7.

13- Tunnelier traversant la station MC-8.

12- TBM in MC-7 Station.

13- TBM passing through MC-8 Station.

diamètre sous le Pont des Lions, à Sofia, dans des conditions de sol difficiles et avec une couverture réduite. Des modèles numériques ont été réalisés pour justifier et quantifier le besoin de traitement de sol à la voûte du tunnel, dans l'Unité 3 du profil géotechnique (graviers) et une approche de management de risque a été utilisée par les acteurs impliqués pour identifier les risques et proposer des mesures de compensation et des mesures d'urgence. Un traitement de sol massif

et/ou une reprise en sous-œuvre sous le pont ont été évités grâce à la confiance à la performance du tunnelier et aux procédures établies sur les tronçons précédemment excavés. Le suivi détaillé et l'analyse du tunnelier et des données enregistrées dans les tronçons antérieurs ont permis d'adapter les procédures de lancement du tunnelier et de mettre au point les paramètres de pression de terre pour un creusement réussi sous le Pont des Lions. □

ABSTRACT

PASSAGE UNDER THE LIONS' BRIDGE IN SOFIA

MARTINO SEMERARO, SYSTRA - BERNARD MERCIER, SYSTRA - NICOLA DELLA VALLE, TUNNEL CONSULT SPAIN - ELENA CHIARIOTTI, SYSTRA

The Lavov Most (Lions' Bridge) is a 19th century masonry structure crossing the Vladayska River in Sofia, Bulgaria. Line 2 of the Sofia Metro passes under the length of this bridge. The tube 9.43 metres in diameter was drilled in soft ground with an EPB tunnel boring machine, under a very thin roof covering, at the level of the bridge foundations. This tricky work was preceded by a risk analysis including a study on a Plaxis 3D finite element model. It was performed with monitoring and compensatory measures. Thanks to these precautions, the detected subsidence did not exceed a few millimetres. □

PASO BAJO EL PUENTE DE LOS LEONES EN SOFÍA

MARTINO SEMERARO, SYSTRA - BERNARD MERCIER, SYSTRA - NICOLA DELLA VALLE, TUNNEL CONSULT SPAIN - ELENA CHIARIOTTI, SYSTRA

El Lavov Most (Puente de los Leones) es una estructura de mampostería del siglo XIX que cruza el río Vladaiska. La línea 2 del metro de Sofía pasa longitudinalmente bajo este puente. El tubo, de 9,43 metros de diámetro, está perforado en suelos blandos con una tuneladora de presión de tierras, bajo una cubierta muy reducida, a nivel de los cimientos del puente. Esta delicada obra ha estado precedida por un análisis de riesgos que incluía un estudio en modelo con los elementos acabados Plaxis 3D. Se ha ejecutado bajo auscultación y medidas compensatorias. Gracias a estas precauciones, la compactación observada sólo ha sido de unos milímetros. □