

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

TRAVAUX SOUTERRAINS. REPARATION DU TUNNEL SOUS LA MANCHE, APRES L'INCENDIE DE 2008. LA GALERIE DE CHOULLY : TRANSPORT DES EAUX USEES ENTRE LA FRANCE ET LA SUISSE. LGV RHIN-RHONE - BRANCHE EST : TUNNEL DE CHAVANNE. LE TUNNEL « DIABOLO » : SOUS L'AEROGARE DE BRUXELLES. AMENAGEMENT ET DEVELOPPEMENT DURABLE : BARRAGE DE RIZZANESE. MODERNISATION : TUNNEL DU MONT-CENIS - FREJUS

N° 865 OCTOBRE 2009

TRAVAUX SOUTERRAINS

865 □ OCTOBRE 2009

TRAVAUX REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

TRAVERSÉE
SOUTERRAINE SUD
DE TOULON,
2nd TUBE
© EMMANUEL GAFFARD



Directeur de la publication
Patrick Bernasconi**Directrice déléguée****Rédactrice en chef**

Mona Mottot

3, rue de Berri - 75008 Paris

Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03

Email : mottotm@fnfp.fr

Comité de pilotageLaurent Boutillon (Vinci Construction
Grands Projets), Jean-Bernard Detry
(Setec TPI), Philippe Jacquet
(Bouygues, Stéphane Monleau
(Solétanche Bachy), Bruno Radiguet
(Bouygues), Claude Servant (Eiffage
TP), Philippe Vion (Systra), François
Vahl (FNTP), André Colson (FNTP),
Mona Mottot (FNTP)**Rubrique Actualité**

Monique Trancart

Service Abonnement et Vente

Com et Com

Service Abonnement TRAVAUX

Bât. Copernic - 20 av. Edouard 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)**Maquette**

Idé Edition

33, rue des Jeûneurs - 75002 Paris

Tél. : +33 (0)1 40 13 89 11

www.ide.fr

Publicité

Régie Publicité Industrielle

Xavier Bertrand - Anne-Sophie Cuvillier

9, bd Mendès France

77600 Bussy-Saint-Georges

Tél. : +33 (0)1 60 94 22 20

Email : bertrand@rpi.fr - cuvillier@rpi.fr

Site internet : www.revue-travaux.com

Réalisation et impression

Com'1 évidence

8, rue Jean Goujon - 75008 Paris

Tél. : +33 (0)1 40 74 64 34

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 bu Travaux). Ouvrage protégé ;
photocopie interdite, même partielle
(loi du 11 mars 1957), qui constituerait
contrefaçon (code pénal, article 425).Editions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0111 T 80259

REGARDS SUR LES CONNAISSANCES ET LES ENJEUX DES TRAVAUX SOUTERRAINS



© DR

En présentant de grands chantiers et en dévoilant le métier de pilote de tunnelier, ce numéro de « Travaux » dédié aux travaux souterrains s'avère particulièrement riche en actualité.

La plupart des auteurs, des sociétés, des entrepreneurs et des constructeurs qui ont collaboré à sa rédaction font partie de l'Association Française des Tunneliers et de l'Espace Souterrain (AFTES) qui, grâce à son gigantesque réseau national et international, contribue de manière significative à l'entretien et au développement d'échanges techniques fructueux entre les divers acteurs de la profession.

L'expérience de tous ces spécialistes sur les travaux souterrains nous permet d'affirmer et de réaffirmer que savoir découvrir, apprendre et comprendre ensemble est devenu un avantage compétitif majeur pour les ingénieries et les entreprises.

Ce numéro spécial dédié aux travaux souterrains a été conçu pour partager des expériences de construction et de réparation de tunnels et de galeries, mais il offre aussi une opportunité pour la transmission du savoir-faire relatif à la maîtrise de l'incertitude.

Il peut également servir de référence à une réflexion personnelle ou collective et permettre ainsi de déboucher sur des actions efficaces et plus déterminantes, sur des mesures préventives et compensatoires pour réduire les risques dans la conception et la construction des ouvrages souterrains.

Et comme le montrent les auteurs, les réalisations présentées sont à la base de changements durables qui resteront à l'avant-garde de nos activités souterraines.

Pour l'avenir la profession bénéficie de trois atouts majeurs :

- Les travaux souterrains sont sur un marché en croissance ;
- Les travaux souterrains intègrent l'approche du développement durable ;
- Enfin, au travers de l'Association Française des Tunneliers et de l'Espace Souterrain, le secteur des travaux souterrains bénéficie d'un réseau international qui peut être utilisé pour une démarche de progrès.

Et, dans une économie de plus en plus tendue, en plus de savoir concevoir et construire, savoir maintenir devient une compétence clé.

Les prochaines années s'annoncent fertiles en projets souterrains, notamment avec le Grand Paris, et il faudra renforcer notre créativité tout en faisant preuve d'une extrême rigueur économique dans leur conception et leur construction. Elles seront aussi marquées par les efforts de notre Association pour améliorer le présent et préparer l'avenir.

Pour le présent, en plus de la production scientifique et technique de notre Comité Technique, de nombreuses initiatives de notre Comité Espace Souterrain sont opérationnelles : des formations de sensibilisation à l'urbanisation souterraine sont en place et un prochain colloque nous permettra de partager une nouvelle ambition pour une meilleure utilisation du sous-sol. De son côté, la Délégation Matériels et Equipements de l'AFTES est une plate-forme efficace pour la promotion et le développement de nouvelles technologies dans notre domaine des travaux souterrains. Également, pour l'avenir, nous considérons que l'éducation et la recherche sont autant de domaines où il nous faut créer le mouvement pour entreprendre.

Définir une nouvelle appétence, adapter les modes de financement, partager les risques, et orienter les contractualisations vers le partenariat. L'enjeu est grand si nous souhaitons, demain :

- Réaliser des espaces souterrains dans le sous-sol de nos villes ;
- Et, grâce aux tunnels, insérer des infrastructures dans le paysage.

Ce numéro illustre bien l'innovation qui reste un impératif incontournable et l'investissement pour l'avenir dans une approche sociétale et environnementale. Aussi ne puis-je que vous souhaiter une excellente réflexion après la lecture de ce numéro.

ALAIN BALAN
PRÉSIDENT DE L'AFTES

PROMOUVOIR DE NOUVELLES UTILISATIONS DE L'ESPACE SOUTERRAIN, ENCOURAGER LES BONNES PRATIQUES ET LE TRANSFERT DES SAVOIRS DANS LE MONDE, DÉVELOPPER ET ANIMER UN RÉSEAU INTERNATIONAL DE TOUS LES ACTEURS IMPLIQUÉS, RENFORCER LA FORMATION PROFESSIONNELLE DU SECTEUR... TELS SONT LES PRINCIPAUX OBJECTIFS DE L'AITES' (ASSOCIATION INTERNATIONALE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN).

YANN LEBLAIS, VICE-PRÉSIDENT DE L'AITES ET DIRECTEUR INFRASTRUCTURE DU GROUPE ARCADIS, EXPLICITE LES ENJEUX DU DÉVELOPPEMENT DE L'ESPACE SOUTERRAIN. PROPOS RECUEILLIS PAR MONA MOTTOT



© DR

« LE POTENTIEL D'UTILISATION DU SOUS-SOL À TRAVERS LE MONDE EST COLOSSAL. LES BESOINS AUGMENTENT, ET PAS SEULEMENT EN TRANSPORT »

Qu'en est-il de l'utilisation de l'espace souterrain comme « lieu de vie » ? Quels sont les « bénéfices collectifs » des travaux souterrains ?

L'intérêt porté à l'utilisation de l'espace souterrain urbain comme « lieu de vie » va croissant car il peut contribuer à la solution de bien des problèmes liés au fort développement des aires urbaines. L'espace souterrain n'est pas uniquement réservé aux réseaux de transport via les tunnels ferroviaires ou autoroutiers ou aux réseaux d'assainissement. D'ailleurs l'AITES (Association Internationale des Tunnels

et de l'Espace Souterrain) ainsi que l'AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain) ont intégré cette notion et cette évolution dans leur appellation.

L'utilisation de l'espace souterrain en site urbain est depuis longtemps une réalité tangible avec les nombreux équipements qui répondent aux logiques d'exploitation de nos villes : les réseaux concessionnaires, les parcs de stationnement, les centrales de froid, les stations-services, les centrales de traitement des déchets ou les centres de stockage.

La Principauté de Monaco est un bel

exemple avec sa gare souterraine, sa centrale de traitement des eaux usées, sa collecte pneumatique des déchets ou son centre d'éclatement des transports.

Mais ces usages demeurent encore très utilitaires et souvent sans accès au grand public, notamment en France, hors les métros et de notables exceptions comme le Grand Louvre à Paris. Pourtant de nombreux espaces souterrains réussis existent aujourd'hui de par le monde : à Helsinki avec des équipements culturels et sportifs, au Japon et à Singapour où les exemples sont si nombreux.

Les projets souterrains se développent et évoluent positivement dans l'acceptation du public quand ils ont un objectif clair et sont réalisés avec qualité. C'est le cas notamment de la Ligne 14 du métro parisien ou de l'extension du métro de Copenhague, avec son tunnel largement éclairé, véritable colonne vertébrale de la rénovation urbaine de la ville.

Chose nouvelle, on perçoit des signaux positifs au-delà des passionnés !

Je ne résiste pas au plaisir de mentionner que le 10 octobre 2008, au Sénat, lors du colloque sur les dix ans de la Ligne 14, le Président de la RATP, dans son plaidoyer pour l'extension du métro parisien, a indiqué que cette solution en souterrain était la bonne car

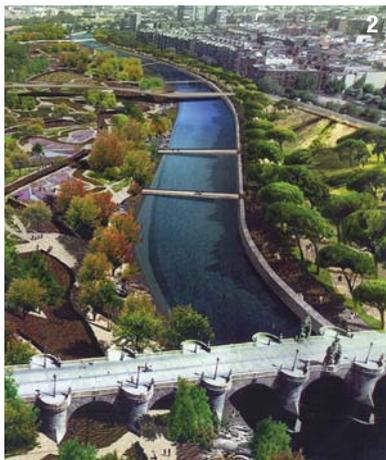
« en souterrain, on ne cisaille pas, on ne démolit pas, on ne crée pas de barrière ».

A contrario, je suis très étonné par l'absence de référence au souterrain dans les dix projets pour le Grand Paris, au profit d'estacades pour métro sur l'A86 ! Cela montre que nous avons encore beaucoup à faire.

L'utilisation du souterrain est-elle compatible avec les préoccupations de développement durable ?

Aujourd'hui, le fort étalement spatial des villes et l'augmentation de la

© DR



consommation des ressources qui en découle, ne sont pas compatibles avec les préoccupations de développement durable. Devant ce constat, un consensus se dessine pour élaborer des politiques territoriales qui mettent en œuvre un redéploiement des espaces urbains vers l'intérieur. Le sous-sol des villes comporte des ressources en espace qui peuvent et doivent servir de telles politiques. Il est toutefois clair que le sous-sol est un milieu fragile et vivant qui mérite attention et anticipation.

Y a-t-il un développement cohérent du souterrain ou bien les projets viennent-ils se greffer les uns aux autres au gré des besoins et des financements ?

En France, l'utilisation de l'espace souterrain urbain manque souvent de coordination, ce qui est fort regrettable. Ces ressources sont souvent utilisées indépendamment les unes des autres, à l'échelle de la construction et non du territoire urbain. Sur le long terme, cette démarche aboutit à des gaspillages, sans parler des conflits. Il paraît dès lors primordial d'analyser le potentiel de ces ressources et de coordonner leur utilisation dans le cadre des processus d'aménagement des territoires. La ville d'Helsinki est exemplaire en la matière : l'occupation du sous-sol est planifiée de façon pluriannuelle, s'appuyant sur un plan d'implantation des projets, en coordination avec les acteurs concernés et la population. En France, l'AFTES a souligné il y a maintenant quinze ans la nécessité d'un plan d'occupation des sous-sols en France, inexistant encore aujourd'hui. Evolution positive, l'AFTES travaille sur ce sujet en liaison avec le Conseil Economique et Social de l'île de France, dans le cadre d'un groupe de travail. Je suis convaincu que nous nous acheminons, lentement

mais sûrement, vers une conception positive et organisée du sous-sol.

Comment ont évolué les pratiques contractuelles, le marché et les financements de projets ? Qu'en est-il de la gestion des risques et des coûts ?

En premier lieu, on peut noter l'exigence accrue de la société et son aversion aux risques, ainsi que la sensibilisation à tout ce qui est lié de près ou de loin au principe de précaution. On constate également une pression de plus en plus forte des assureurs, suite aux accidents liés aux travaux souterrains survenus au cours des 15 dernières années. L'imagination et le portefeuille sont frappés par l'effondrement en mars dernier du bâtiment des Archives à Cologne (Allemagne) dans le cadre du projet de métro en cours de réalisation à proximité, ou par des accidents antérieurs liés au souterrain à Singapour, à Sao Paulo ou à Heathrow... Tous ces sinistres ont coûté très cher aux assureurs qui, en coordination avec les réassureurs et les associations professionnelles concernées dont l'AITES, ont édité en 2004, sous l'égide de l'ITIG², un code régissant les « bonnes pratiques » pour un meilleur management des risques dans le souterrain. Ce code apporte des recommandations à toutes les phases d'un projet : conception, contractualisation et construction proprement dite. En cas d'entorse aux bonnes pratiques, les assureurs se réservent le droit de remettre en cause la couverture d'assurance. Leur leitmotiv : « pas de bonnes pratiques, pas d'assurance et donc pas d'ouvrage ». Les pratiques de tous les acteurs de la chaîne sont visées, y compris celles du maître d'ouvrage, introduisant une sensibilité aux risques

mieux équilibrée entre les différents acteurs.

Il convient de souligner également que l'augmentation importante des contrats de partenariat – conception-construction, PPP (partenariat public-privé)... - conduit, pour atteindre l'objectif final, à une intégration des acteurs à toutes les phases d'un projet plus forte que dans les marchés classiques. Sans verser dans l'angélisme, je juge très positive pour le secteur des infrastructures cette intégration de tous les partenaires autour d'un projet. Elle implique un respect mutuel et par là-même, de meilleures pratiques contractuelles, un meilleur équilibre, une optimisation de l'analyse et du management des risques, et donc en cas de difficultés moins de gestion conflictuelle et plus de gestion technique.

Quelles sont les dernières évolutions techniques du secteur en termes de matériels, de procédés... ?

Quel que soit le mode de creusement, tunneliers ou techniques conventionnelles, on constate une très forte mécanisation et robotisation. Toutes les avancées récentes en termes d'automatisme,

capteurs et informatique ont été intégrées dans les matériels pour fiabiliser les opérations, accroître la productivité des engins, permettre une surveillance en temps réel ainsi qu'une traçabilité des opérations et accroître la sécurité des hommes. Ces avancées sont autant visibles dans les tunneliers que dans les méthodes conventionnelles : forage, minage, pose de soutènement...

On enregistre également des évolutions technologiques dans le domaine des explosifs, notamment les liquides qui sont de plus en plus sûrs, efficaces, rapides à mettre en œuvre. A noter également les progrès apportés avec l'utilisation des bétons de fibres, y compris dans les voussoirs préfabriqués. La gestion des déblais et des eaux s'est améliorée dans le respect de l'environnement et la réutilisation des matériaux de déconstruction est de plus en plus pratiquée, comme dans les autres métiers de génie civil. Le renforcement de la sécurité incendie (conception et technologie) s'est imposée parmi les priorités des pouvoirs publics et de la profession, depuis les incendies du tunnel du Mont-Blanc, du Tauern et autre Gothard. Les réglementations ont été remises à plat et de nouvelles recherches ont été lancées aux échelles nationale, européenne et internationale visant à améliorer la compréhension des incendies en tunnel et à en limiter les conséquences.

Les techniques évoluent avec, par exemple, la mise au point de systèmes de protection par brouillard d'eau à haute pression encore en phase de développement mais dont les expérimentations commencent à démontrer l'efficacité. Autre évolution notoire à travers le monde, la maîtrise du coût global s'implante avec une meilleure intégration dans la conception des

1- Danemark : métro de Copenhague.

2- Espagne : mise en souterrain de la M30 (périphérique) à Madrid.

3- Finlande : image du futur métro vers l'aéroport.

4- Allemagne : projet de la nouvelle ligne à grande vitesse incluant une gare souterraine et une ré-urbanisation du quartier à Stuttgart.

5- États-Unis : remplacement d'un viaduc par un tunnel à Seattle.



ouvrages des contraintes liées à la solidité et à la réalisation, avec celles liées à la maintenance voire à la déconstruction.

On note aussi un phénomène intéressant dans l'association du public à la l'appropriation et à la réalisation de l'ouvrage, comme ce fut le cas avec l'exposition Socatop sur l'A86, intégrant une maquette grandeur nature du tunnel.

Quels sont les principaux axes de R & D concernant le souterrain ?

Je retiendrai trois axes principaux. Le premier axe n'est pas nouveau mais toujours d'actualité : la reconnaissance en avant du front de taille en cours de creusement afin d'identifier de manière toujours plus précise le milieu, en localisant les hétérogénéités, en détectant les anomalies de comportement mécanique du terrain, et en fournissant des informations géotechniques pertinentes. Ces investigations sont menées par méthodes sismiques, acoustiques ou mécaniques utilisant le front de taille ou le tunnelier comme support des sources et des capteurs. Le deuxième axe de recherche concerne la modélisation physique des têtes de tunneliers et l'analyse des comportements en fonction des modèles étudiés. Ces recherches dans le cadre de projets de recherche nationaux ou européens permettent d'atteindre de nouveaux objectifs : l'amélioration de la précision de guidage du tunnelier, la maîtrise de l'usure des outils, la maîtrise du comportement viscoélastique du terrain (tassements et fontis pouvant entraîner des effondrements en surface, etc.). On peut rappeler que l'AFTES avait lancé le mouvement il y a quinze ans avec les travaux du projet national Eupalinos au sein de l'ENTPE à Lyon. Le troisième domaine de recherche concerne la maîtrise des incendies en tunnel et la résistance au feu des structures. Si certaines structures ne posent pas de problème de stabilité en cas d'incendie (tunnels creusés dans un rocher sain par exemple), d'autres peuvent conduire à un lourd sinistre en cas de rupture locale (tunnels immergés ou tunnels creusés en terrain meuble aquifère). Un comité de l'AITES étudie ces problématiques afin d'établir des recommandations techniques dans ce domaine.

UN OUVRAGE SOUTERRAIN N'EST PLUS UN SIMPLE OBJET DE GÉNIE CIVIL MAIS UN OUVRAGE COMPLEXE, MULTIDISCIPLINAIRE, DONT LA COMPLEXITÉ EST RÉGIE AUSSI PAR L'USAGE AUQUEL IL EST DESTINÉ

Quelles sont les principales missions de l'ITA-AITES ? Quelles sont ses priorités aujourd'hui ?

Fondée en 1974 et basée à Lausanne, l'ITA-AITES compte aujourd'hui 55 pays membres. La principale mission de l'Association est la promotion de l'utilisation de l'espace souterrain et des tunnels, à travers plusieurs objectifs :
 → Promouvoir de nouvelles utilisations de l'espace souterrain, en encourageant l'étude d'alternatives souterraines à la surface de construction présentant des avantages sociaux et environnementaux.
 → Promouvoir les bonnes pratiques et le transfert des savoirs pour la planification, les reconnaissances géotechniques, la conception, la construction, l'exploitation, la maintenance et la sécurité des structures souterraines, ainsi que, point fort, le management des risques.
 → Constituer un réseau international réunissant tous les acteurs impliqués dans le développement de l'espace souterrain, tels que les ingénieurs, les architectes urbanistes, les donneurs d'ordres, les économistes, les assureurs, etc.
 → Organiser des échanges internationaux sur l'évolution de la technologie souterraine et de l'expérience de son utilisation. Pour atteindre ces objectifs, l'ITA-AITES a mis en place douze groupes de travail internationaux pour l'étude de sujets spécifiques. Parallèlement, elle a lancé trois comités :
 → ITA-COSUF, Comité pour la sécurité opérationnelle dans les

installations souterraines, avec la collaboration de l'Association mondiale de la Route, AIPCR, et tous les grands organismes européens de recherche sur les incendies.

→ ITA-CET, Comité pour l'éducation et la formation professionnelle, appelé « Réseau universitaire ». Ce comité est aussi le pilote conceptuel d'une fondation ad hoc en cours de création.

→ ITA-CUS, Comité de l'espace souterrain.

Quels sont les objectifs de l'ITA-AITES à travers la création de la nouvelle Fondation pour l'éducation et la formation professionnelle ?

La Fondation aura la capacité d'offrir ses services dans le domaine de l'éducation et de la formation professionnelle aux entreprises et professionnels travaillant dans le secteur très spécifique des tunnels et de l'espace souterrain, qu'il s'agisse de techniciens, de juristes, de financiers ou

d'environnementalistes. Son but est de resserrer les liens entre les universitaires, les chercheurs et les entreprises. Plus encore, elle sera active dans les pays qui n'ont pas les moyens financiers pour organiser ces formations spécialisées. Son activité se développera autour de diverses actions. Tout d'abord la validation au niveau international du Master déjà dispensé dans certaines universités comme celle de Turin, Lausanne et Madrid, et bientôt celle d'Athènes, le Texas et Lyon. Ensuite, la continuation de l'organisation de sessions de deux jours de formation dans le pays d'accueil – comme c'est le cas depuis 2005 - dispensée par les spécialistes internationaux en la matière, dans le cadre des conférences annuelles de l'AITES. □

1- En langue anglaise, l'AITES est dénommée ITA (International Tunnelling and underground space Association). L'Association est souvent désignée par ITA-AITES.

2- International Tunnelling Insurance Group – Traduction française dans AFTES - TOS 214 - juillet/2009.

PRINCIPAUX PROJETS DE TUNNELS EN 2010

EN FRANCE

- Tunnel de Saverne (4 km) - LGV Est.
- Tunnel du tramway Viroflay - Vélizy (1,6 km).
- Tram-Train de la Réunion (12 km de tunnel).
- Contournement de Grenoble.
- Tunnel de Tende (3,25 km) France-Italie.
- Tunnels SIAAP VL9 (1,6 km).

EN EUROPE

- Crossrail, Londres (8 tunneliers prévus).
- Ligne D du métro de Rome (20 km) en concession.
- Madrid – nouvelle liaison ferroviaire (17 km).
- Métro d'Helsinki (14 km) partie intégrante du plan d'urbanisme souterrain de la ville.
- Tunnel du Ceneri bi-tubes 11,5 km situé sur l'axe du Gothard (Suisse).
- Tunnel de base de Koralm (2 x 19 km) Autriche.
- Ligne 2 du métro de Varsovie (6,3 km).
- Tunnels pour les LGV en Espagne : Pays Basque, Costa del Sol.
- Allemagne : projet Stuttgart 21 comprenant une gare souterraine et 33 km de tunnels.
- Norvège : tunnel ferroviaire (19 km).
- Métro de Copenhague.

DANS LE RESTE DU MONDE

- Métro du Caire - Ligne 3, tunnelier NFM.
- Canada : LRT Tunnels à Vancouver et Toronto ; tunnels d'assainissement à Vancouver et dans l'Ontario.
- Chine : métros à Beijing, Tianjin, Shanghai, Shenzhen, Guangzhou, Zhengzhou, tunnels ferroviaires environ 3 500 km de tunnels en construction.
- Seattle, Alaska Highway tunnel (remplacement d'un viaduc par un tunnel) ; East river access.

RÉPARATION DU TUNNEL SOUS LA MANCHE, APRÈS L'INCENDIE DE SEPTEMBRE 2008, EN MOINS DE QUATRE MOIS

AUTEURS : CHRISTIAN MAQUAIRE, DIRECTEUR INDUSTRIEL ET DIRECTEUR DE LA MAÎTRISE D'OUVRAGE DES RÉPARATIONS, EUROTUNNEL - PHILIPPE ZANKER, DIRECTEUR GÉNÉRAL, FREYSSINET - BERTRAND PETIT, DIRECTEUR DU CHANTIER DE RÉPARATIONS, FREYSSINET - VÉRONIQUE MAUVISSEAU, ADJOINTE AU DIRECTEUR DE LA MAÎTRISE D'OEUVRE DE RÉPARATIONS, SETEC - MICHEL KAHAN, DIRECTEUR DE LA MAÎTRISE D'OEUVRE DE RÉPARATIONS, SETEC

LE 11 SEPTEMBRE 2008, L'INCENDIE QUI S'EST DÉCLARÉ À BORD D'UNE NAVETTE FERROVIAIRE TRANSPORTANT DES CAMIONS DANS LE TUBE NORD DU TUNNEL SOUS LA MANCHE, À 11 KM DU PORTAIL FRANCE, A ENDOMMAGÉ LA VOÛTE EN BÉTON SUR UNE LONGUEUR DE 760 M (TRÈS SÉRIEUSEMENT SUR UNE SECTION D'UNE CENTAINE DE MÈTRES), ET A NÉCESSITÉ LE REMPLACEMENT DES ÉQUIPEMENTS SUR ENVIRON 2 KM. EUROTUNNEL A RAPIDEMENT REMIS EN SERVICE LA LIAISON ENTRE LE CONTINENT ET LA GRANDE-BRETAGNE, EN ORGANISANT LA CIRCULATION DES TRAINS DANS LES CINQ INTERVALLES DU TUNNEL NON TOUCHÉS PAR L'INCENDIE, PUIS A PROCÉDÉ AU DÉMANTÈLEMENT DE LA NAVETTE INCENDIÉE ET AU DÉBLAIEMENT DE LA ZONE ENDOMMAGÉE. EN PARALLÈLE, EUROTUNNEL S'EST ADJOINT LES SERVICES DE SETEC POUR LA MAÎTRISE D'ŒUVRE ET DE FREYSSINET À LA TÊTE D'UN GROUPEMENT DE SOCIÉTÉS DU GROUPE VINCI POUR LES TRAVAUX DE RÉPARATION.

Les travaux de réparation du tunnel sous la Manche se sont déroulés dans un temps record de moins de 4 mois à compter du 17 octobre 2008, au travers des principales étapes suivantes :

→ Mise en sécurité de la voûte par 1072 boulons de 3 m de long.

→ Mise en place d'une piste (3 200 tonnes de ballast recouvert de traverses en bois ignifugé) permettant un accès facile et une large coactivité.

→ Hydro-décapage du béton résiduel dégradé et mise en place d'un échafaudage de 520 m.

→ Reconstitution de la voûte (49 t de ferrailage et 4000 t de béton projeté par voie sèche).

→ Remplacement des équipements électriques, mécaniques, caténaïres, rails et signalisation.

→ Essais et réception.

Pour parvenir à cet objectif de délai ambitieux, il a fallu mobiliser des moyens quelque peu exceptionnels, industrialiser les process tout en conservant une forte adaptabilité du chantier. Le pilotage serré de l'opération, tant dans l'espace que dans le temps, au travers notam-

ment d'une forte collaboration entre les acteurs, l'anticipation des achats des fournitures critiques et l'information régulière du comité de sécurité de la Commission inter-gouvernementale - qui a donné son feu vert pour la réouverture au service commercial le 9 février 2009, ont été des éléments déterminant de la réussite de ce projet.

L'INCENDIE ET LA REMISE EN EXPLOITATION PARTIELLE

Le jeudi 11 septembre 2008 à 15h55, une navette transportant des camions prend feu dans l'intervalle 6 du tunnel sous la Manche, à 11 km de la sortie côté France (figure 1). L'incendie est immédiatement détecté et les 32 personnes à bord aussitôt évacuées dans le tunnel de service, toutes saines et sauvées.

Une fois le feu éteint, Eurotunnel procède à l'inspection complète du tunnel ferroviaire sud non affecté par l'incendie. Le service commercial reprend progressivement, trente heures à peine après le début du sinistre. D'abord uniquement dans le tunnel sud, puis, après un nettoyage approfondi, de minutieuses inspections de sécurité et une série de

tests, successivement dans les intervalles 2 et 4, les 22 et 28 septembre. Jusqu'à 200 trains empruntent ainsi le tunnel chaque jour, ce qui représente 60 % de l'activité normale ; une situation qui durera jusqu'à la fin des travaux de réparation.

Le 1^{er} octobre, la Justice autorise l'accès à la navette incendiée. Les équipes d'Eurotunnel mettent en place un ingénieux système comprenant cinq camions aspirateurs juchés sur des wagons plats pour collecter les débris de l'incendie et dégager les carcasses. En 14 jours, tous les éléments de la navette sont sortis du tunnel et l'intervalle 6 est totalement déblayé le 16 octobre (photo 2). Les travaux de réparation peuvent commencer le 17.

DIAGNOSTIC ET ÉTUDES PRÉALABLES

L'analyse des dégâts causés à la structure de l'ouvrage a permis de délimiter les zones endommagées :

→ Génie Civil : la zone endommagée s'étend sur une longueur de 760 mètres entre les PK 48 130 et 48 890. Une zone plus touchée de 90 m et une

zone extrêmement touchée - avec parfois disparition quasi complète d'une partie du voussoir - d'une longueur de 16 m située entre les PK 48 417 et 48 433. → Equipements fixes : les matériels existants ont subi des dommages sur une longueur de 2 km environ, principalement entre les PK 47 300 et 49 300.

DIAGNOSTIC DU GÉNIE CIVIL

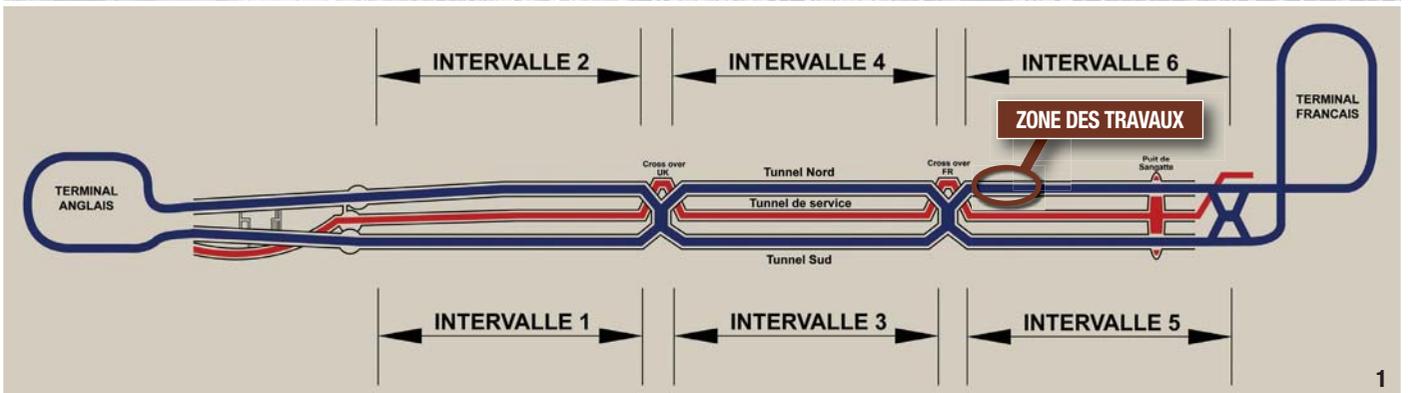
Le diagnostic visuel du génie civil a été complété par 3 modes d'investigations : essais en laboratoire à partir d'échantillons, investigation géométrique et essais in situ.

Essais en laboratoires

Compte tenu du nombre important d'échantillons à analyser, plusieurs laboratoires ont été sollicités pour réaliser les essais avec pour objectif de :

→ Caractériser la craie dans la zone de l'incendie : une centaine de carottes a été prélevée au niveau de la zone endommagée pour évaluer la qualité du massif environnant l'ouvrage.

→ Caractériser le béton de voussoir et le mortier de bourrage dans la zone incendiée. Le béton de voussoir a particulièrement bien vieilli puisqu'il



affiche une résistance moyenne à la compression de 81 MPa alors que sa résistance visée lors de la construction était de 55 MPa. Avec les essais réalisés sur le béton de structure et de bourrage, il a été possible de valider les valeurs de module, de résistance à la compression et à la traction prises par anticipation dans le modèle de calcul du revêtement.

→ Vérifier que les caractéristiques chimiques et mécaniques des armatures restant en place n'ont pas été altérées afin de statuer sur la possibilité de les conserver lors de la réparation du revêtement.

L'essai au microscope électronique à balayage (MEB) couplé à une analyse qualitative par spectrométrie X à dispersion d'énergie (EDS) de divers échantillons a permis dans un premier temps d'évaluer l'épaisseur de béton altéré restant après l'incendie, puis de vérifier, dans un deuxième temps, l'efficacité de la purge du béton par hydro-décapage, sur une nouvelle série de carottes.

Géométrie

Trois levés scanners ont été réalisés au cours du chantier :

→ Levé scanner 1 - état zéro du tunnel après incendie : ce levé constitue la base de travail permettant de définir grossièrement les dégradations types, les épaisseurs résiduelles de béton, de façon à définir la réparation du revêtement à mettre en œuvre et une estimation des quantités (béton projeté, armature...) nécessaires aux commandes de l'entreprise.

→ Levé scanner 2 - état après hydro-décapage : permet de définir le volume de béton retiré par l'hydro-décapage et d'affiner le zoning des réparations ainsi que les quantités.

→ Levé scanner 3 - état après réparation du revêtement et pose des équipements : ce levé constitue un état zéro du tunnel réparé ; il permet de vérifier les réparations (enrobage des armatures et épaisseur de béton projeté mis en place) et de confirmer le gabarit dynamique (également validé par le passage d'un gabarit physique).

Des mesures de convergences durant les travaux ont permis de suivre la stabilité géométrique du tunnel durant les différentes phases de réparation. Aucun mouvement significatif n'a été détecté.

Essais in situ

Des essais de relâchement de contraintes ont été réalisés dans les locaux de la station de pompage W3, de façon à déterminer l'état de contrainte de certaines sections d'ouvrages à géométrie complexe difficilement accessible par le calcul. Les résultats obtenus ne ►

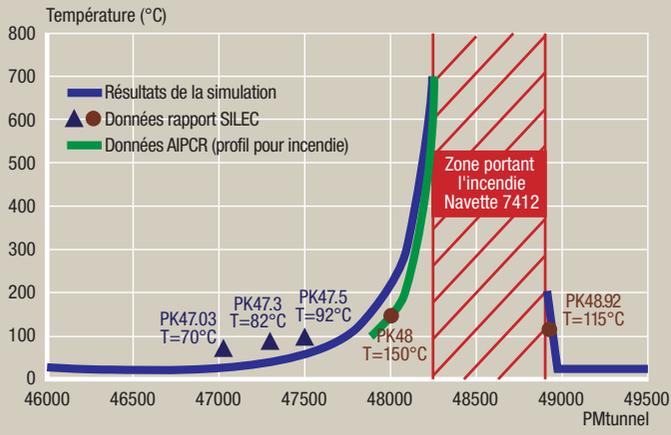
1- L'incendie se déclare dans l'intervalle 6 du tunnel.

2- Sortie de la navette incendiée.

1- Fire breaks out in tunnel section 6.
2- Exit of the burnt shuttle.

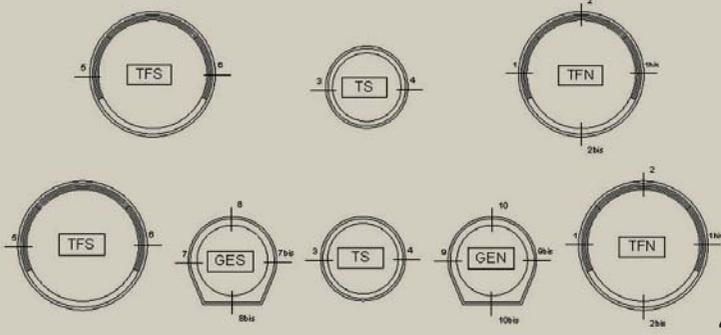


COURBE ENVELOPPE DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR



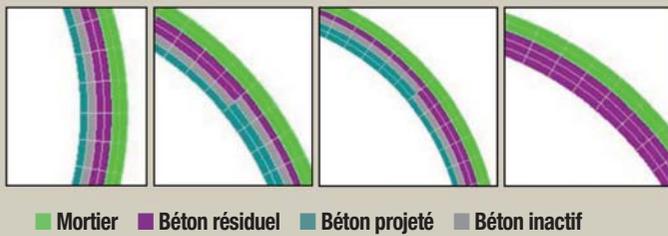
3

MODÉLISATION DES DEUX SECTIONS TYPES



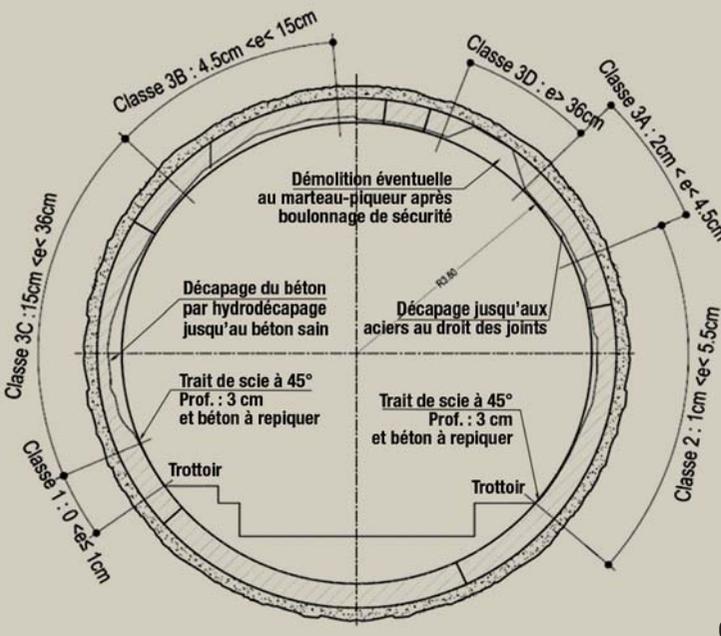
4

POSITIONS SUPPOSÉES DES ALTÉRATIONS



5

CLASSES DE RÉPARATION SUR UN ANNEAU



6

montrent pas de niveau de contrainte non admissible dans le béton de la station de pompage.

DIAGNOSTIC DES ÉQUIPEMENTS

La maîtrise d'oeuvre des équipements a été réalisée par Systra associé à Setec et Inexia. Les dégâts suivants ont été constatés :

- Sur les équipements caténaires : 3 tirs ;
 - Les équipements de signalisation se trouvant entre le PK 48 300 et le 48 450 ont été totalement détruits. Les câbles de signalisation se trouvant dans le trottoir d'évacuation, par contre, ne semblent pas avoir subi de dommages apparents ;
 - Les équipements de contrôle et commande dont les systèmes radio de la zone centrale de l'incident ne fonctionnent plus ;
 - Les chemins de câbles en matière synthétique Modar dans la zone centrale de l'incendie sont réduits à l'état de fibres ; en limite de zone incendiée, certains câbles présentent des boursofflures apparentes, l'ensemble des colliers d'attache des câbles 21 et 3.3 kV a fondu ;
 - Certains coffrets électriques situés dans les rameaux de pistonement (tunnels secondaires d'aération) ont été détériorés ; les câbles correspondants ont été endommagés dans la zone de l'incendie ;
 - Les supportages ne sont plus assurés ;
 - Les équipements mécaniques ont également soufferts, notamment les tuyaux de refroidissement (cooling), main courante.
- En plus du constat visuel, le diagnostic des équipements a été complété par des tests fonctionnels, des expertises destructives ou non destructives selon

3- Courbe enveloppe de la température de l'air.

4- Modélisation des deux sections types.

5- Positions supposées des altérations.

6- Classes de réparation sur un anneau.

3- Air temperature envelope curve.

4- Modelling of two typical sections.

5- Presumed damage locations.

6- Classes of repairs on a ring.

TABLEAU A

Classe	Épaisseur manquante	Épaisseur résiduelle	Réparation
1	$e \leq 1 \text{ cm}$	39 cm mini	Minéralisation
2	$1 \text{ cm} < e \leq 5,5 \text{ cm}$	34,5 à 39 cm	Mortier de ragréage + grillage de carreleur (photo 7)
3A	$2 \text{ cm} < e \leq 4,5 \text{ cm}$	35,5 à 38 cm	Béton projeté + ajout d'aciers HA8 sur les joints + grillage de carreleur
3B	$4,5 \text{ cm} < e \leq 15 \text{ cm}$	25 à 35,5 cm	Béton projeté + aciers HA8 filants sur 3 voussoirs + renfort vertical HA12 (photo 8)
3C	$15 \text{ cm} < e < 36 \text{ cm}$	4 à 25 cm	idem classe B + épingles HA8 esp 24 x 24 cm
3D	$e \geq 36 \text{ cm}$	Moins de 4 cm	idem classe D + épingles HA8 recourbées derrière ferrailage extradoss

les cas, et par comparaison avec une simulation par le calcul des températures atteintes dans le tunnel.

Les principaux tests mécaniques ont consisté en :

→ Des essais des ancrages et des supports,

→ Pour les rails : des tests de dureté et des mesures de contraintes par les services techniques d'Eurotunnel et IG SNCF laboratoire des rails et le passage du véhicule de contrôle « Mauzin »,

→ Pour les blochets et inserts béton ainsi que pour les semelles et les chaussons élastiques des blochets de voie : tests de résistance et de traction par le Cebtp Solen, SNCF IG laboratoire des rails et par le Cetim,

→ Pour la caténaire : des échantillons des câbles contact, porteur, et feeder, ainsi que des bras de rappel, ont fait l'objet d'essais de traction et de mesures d'allongement à la rupture,

→ Pour la signalisation ferroviaire : expertise des câbles par IGSF et LCIE,

→ Pour les câbles électriques : expertise par Silec Cable,

→ Pour la canalisation réseau incendie DN400 et cooling : expertise peinture par EMTS,

→ Pour la canalisation cooling DN400 : tests mécaniques réalisés par l'Institut de Soudure,

→ Pour la ventilation : contrôle de la planéité et de l'intégrité des viroles et des portes.

Une simulation thermique a permis de comparer le résultat des diverses analyses aux évolutions probables de la température dans le tunnel lors de l'incendie, afin de s'assurer qu'au-delà des limites géographiques de remplacement, les équipements n'ont pas été soumis à une ambiance dont la température a été supérieure à celle pour laquelle ils ont été conçus.

La simulation numérique a été réalisée à l'aide d'un modèle aérodynamique monodimensionnel du tunnel (Express' air de Setec). Cette simulation s'appuie sur une estimation de la cinétique de l'incendie à partir des données relatives aux chargements et les courbes standardisées de puissance d'incendie de poids lourds éditées par le CETU dans le cadre de l'Établissement des Etudes Spécifiques de Danger en tunnel. Cette simulation prend également en compte la chronologie des événements pendant toute la durée de l'incendie, en particulier les régimes de la ventilation NVS (natural ventilation system) et SVS (supplementary ventilation system) et les ouvertures des CP (cross-passages).

En outre, la simulation prend en compte

la limite potentielle maximale de puissance de l'incendie compte tenu de l'apport possible en oxygène contenu dans l'air de ventilation.

Ce calcul numérique a permis d'établir une courbe théorique enveloppe de l'évolution des gaz au-delà de la zone portant les foyers (figure 3).

L'analyse montre que la température des gaz donnée diminue rapidement le long du tunnel pour atteindre une valeur de 100°C maximum à environ 550 m de l'extrémité de la rame incendiée. Cette courbe confirme les constats et les expertises réalisés sur les différents équipements, en particulier l'expertise des câbles faite par la société Silec Cable et l'expertise sur les câbles caténaires effectuée par le Cetim.

ÉTUDES PRÉALABLES

Des études préalables, lancées quelques jours après l'incendie, ont consisté à :

→ Vérifier la tenue du tunnel en l'état après incendie,

→ Vérifier que les réparations envisagées, par reconstitution du voussoir en béton projeté, sont correctes.

Les calculs ont été effectués suivant la méthode « convergence - confinement ». Ils ont été menés à l'aide d'une modélisation bidimensionnelle aux éléments finis en déformations planes à l'aide du programme CESAR-LCPC.

L'incendie a eu lieu au droit de la station de pompage W3 au voisinage de laquelle deux sections types sont présentes (figure 4) :

→ Une section à 3 tubes, les tunnels ferroviaires étant distants de 15 m du tunnel de service (géométrie identique à celle étudiée lors de l'incendie de 1997) ;

→ Une section à 5 tubes comprenant les tunnels ferroviaires (distants de 20 m du tunnel de service) ainsi que les deux galeries d'équipements (situées entre les tunnels ferroviaires et le tube de service).

Deux hypothèses de comportement ont été envisagées :

→ Le revêtement a perdu son chargement au cours de l'incendie et il ne récupère de nouveaux efforts après incendie que par le biais des nouvelles déformations différées de la craie ; ces nouveaux efforts sont supportés soit par le béton résiduel seul, soit par le revêtement composite formé du béton résiduel des voussoirs et du béton projeté de réparation, soit par le béton projeté seul. Ce cas est le plus défavorable pour les revêtements des galeries voisines.

→ Le revêtement a conservé son chargement au cours et après l'incendie.

Ce cas théorique, défavorable pour le revêtement réparé, est simulé en calculant les efforts dans le revêtement composite comme s'il avait été mis en place à l'arrière du tunnelier au moment du creusement supposé se produire avec les autres galeries déjà creusées et revêtues. Diverses positions d'altération et d'épaisseur altérées ont été envisagées, par série de 10 cm (cas A à D) (figure 5).

En fonction des incertitudes sur le module d'Young au moment des calculs et des 3 points ci-dessus, 38 calculs ont dû être effectués.

PRINCIPES DE RÉPARATION DU GÉNIE CIVIL

CLASSES DE RÉPARATION, PERFORMANCES REQUISES DU BÉTON

La réparation du revêtement a été effectuée selon 6 classes de traitement, définies en fonction de l'épaisseur « e » de béton manquant (figure 6 - Tableau A).

FORMULATION ET ESSAIS DE CONVENANCE DU BÉTON

L'expérience acquise en 1997 et le savoir-faire de l'entreprise ont fortement orienté le choix de la technique du béton projeté par voie sèche pour réaliser la reconstruction des 10 000 m² de voussoirs endommagés par l'incendie. Les délais du chantier ne permettaient pas d'entreprendre des études de formulation (mise en œuvre prévue 6 semaines après le démarrage du chantier).

Freyssinet, assisté de ses experts a donc choisi de formuler un béton à partir d'une composition connue et couramment utilisée par ses équipes en s'appuyant sur un fournisseur capable de respecter le cahier des charges en termes de :

→ Qualité, notamment la propreté des granulats :

- Sable 0-4 : module de finesse européen selon la norme EN12620 : valeur mini = 2,92 valeur maxi = 3,52 ;

- Sable 4-8 : teneur en fines selon normes 933-1 = 1,5 % maxi ;

- Bilan des alcalins < 3.00 Kg/m³.

→ Délais : livraison de 4 000 t de béton en 2,5 mois incluant les périodes de maintenance de l'usine de production programmées durant les fêtes de fin d'année.

Le 20 octobre 2008, il a été testé à Montluel (01) deux formules de bétons, sans fibres et avec adjonction de fibres métalliques, projetées dans des caisses conformément aux règles de l'ASQUAPRO.

LES PRINCIPALES DATES

11 SEPTEMBRE 2008

Incendie d'une navette-camions dans l'intervalle 6 du tunnel sous la Manche.

13 SEPTEMBRE 2008

Reprise de la circulation des trains dans le tunnel sud.

22 SEPTEMBRE 2008

Reprise de la circulation des trains dans l'intervalle 2 du tunnel nord.

28 SEPTEMBRE 2008

Reprise de la circulation des trains dans l'intervalle 4 du tunnel nord.

1^{ER} OCTOBRE 2008

Sortie du premier tiers de la navette endommagée.

10 OCTOBRE 2008

Approbation des contrats pour la rénovation de l'intervalle 6 du tunnel sous la Manche. La maîtrise d'œuvre est confiée à Setec et les travaux à un groupement d'entreprises comprenant Freyssinet, Eurovia Travaux ferroviaires, Vinci Energies.

14 OCTOBRE 2008

Sortie de la locomotive de queue de la navette endommagée.

17 OCTOBRE 2008

Début des travaux de réparation.

9 JANVIER 2009

Fin du bétonnage.

9 FÉVRIER 2009

Réouverture complète du tunnel sous la Manche, reprise du trafic commercial dans l'intervalle 6.

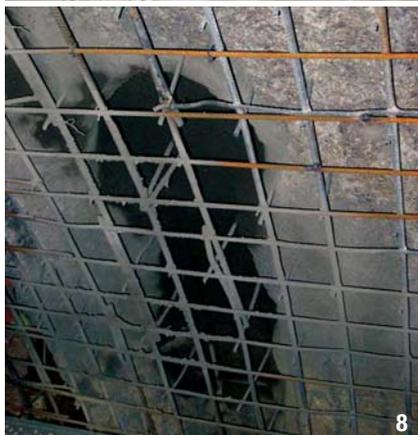
Le 27 octobre 2008, la lecture des résultats d'essais à la compression sur les éprouvettes réalisées à partir des caisses d'essais confirme que les montées en résistance des bétons non fibrés dosés à 440 kg/m³ sont conformes aux prévisions et doivent atteindre les 55 MPa à 28 jours requis dans le cahier des charges alors que le béton fibré n'atteint pas cette valeur.

La solution béton fibré est abandonnée et la production des 4 000 big-bags d'une tonne lancée.

Un atelier d'essais est installé à l'extérieur du tunnel pour organiser un stage de remise à niveau pour les 32 portelances certifiés Asquapro mobilisés pour le chantier.



7- Réparation par ragréage.



8- Reprise du ferrailage.

9- Wagon voyageurs et gare.



10- Ventilation de chantier.

11- Jumbo sur train.



7- Repair by resurfacing.

8- Reworking of reinforcing bars.

9- Passenger wagon and station.

10- Site ventilation.

11- Jumbo crane on train.

Les délais de fabrication et de mobilisation du matériel de projection ne permettent pas la réalisation d'essais de convenance dans le tunnel pour avoir des résultats à 28 jours avant le lancement de la campagne de mise en œuvre des bétons.

La décision est prise de réaliser une série de caisses par jour avec un projeteur différent pour suivre la régularité de la montée en résistance à jeune âge (2 jours et 7 jours) et la constance des porte-lances. La projection des zones les plus fortement dégradées ne commence que 14 jours après les premières projections et ce avec des résultats d'essais à 7 et 14 jours prometteurs.

Un organisme de contrôle externe est mobilisé pour suivre 7j/7] le programme de contrôle élaboré pour ce chantier.

INSTALLATIONS DE CHANTIER ET LOGISTIQUE INSTALLATIONS EXTÉRIEURES

Afin d'optimiser les travaux, Eurotunnel a réalisé des aménagements importants à l'extérieur du Tunnel :

→ Une base vie à proximité de l'entrée du tunnel pour accueillir les responsables d'Eurotunnel, de la Setec et des entreprises travaillant sur le chantier.

→ Une base travaux à quelques centaines de mètres du site. Vestiaires et douches sont mis à disposition des ouvriers.

→ Un wagon voyageurs disposant de 100 places assises spécialement acquis pour acheminer les ouvriers sur le chantier (photo 9). Ce wagon, attelé à un train de travaux, fait la navette à chaque relève d'équipe, soit trois fois par jour (à 8h, 16h et minuit), entre la station construite près de la base et la zone des travaux.

→ Une aire de 5 000 m² et un quai de chargement situés le long de la voie ferrée (voie 36) pour la préparation et le chargement des équipements sur les trains de travaux.

→ Un terrain d'une superficie de 3 hectares à proximité de la zone de

maintenance d'Eurotunnel pour stocker le matériel, notamment les tuyaux du système de refroidissement.

Les installations extérieures propres à l'Entreprise au niveau des voies 36 se limitent à une zone atelier / magasin et une zone de stockage tampon des big-bags de béton à proximité des trémies de chargement des wagons-citernes EVS. Dans la zone portuaire de Calais, 6 000 m² d'entrepôts ont été loués pour stocker les 4 000 t de béton livrées avant les travaux de projection.

VENTILATION DE CHANTIER

Compte tenu du besoin d'utiliser des matériels consommateurs de fuel, la ventilation de chantier est un point primordial pour la réalisation des travaux (figure 10).

L'alimentation en air du chantier est assurée par l'utilisation de la surpression du tunnel de service.

La fermeture aux déperditions est assurée par la mise en place d'un sas côté UK du tunnel et d'un sas chantier entre le tunnel de service et le tunnel ferroviaire.

La ventilation est dimensionnée pour assurer un courant d'air à une vitesse moyenne de 2 m/s.

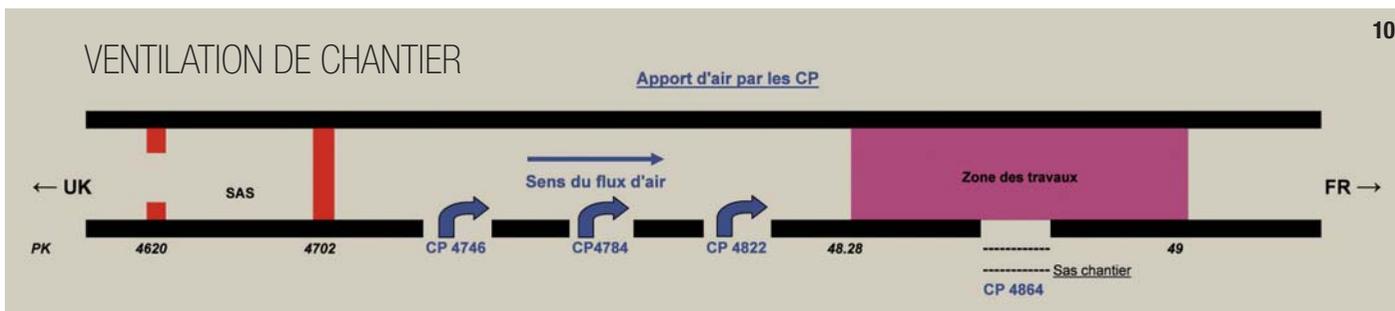
Cependant, le pistonement dû à l'exploitation des trains dans le tunnel et la situation d'étanchéité conduisent à des variations de vitesse enregistrées sur le chantier. Les chefs d'équipe étaient équipés de détecteur de CO durant les phases nécessitant l'intervention de nombreux engins (hydrodécoupage, projection de béton...).

DÉROULEMENT DES TRAVAUX

SÉCURITÉ DES OPÉRATIONS

La sécurité des travaux est une préoccupation majeure.

Un coordonnateur Sécurité et Protection de la Santé est mis en place par le maître d'ouvrage. Il tient le CISSCT (Collège Interentreprises de Sécurité, de Santé et des Conditions de Travail) et des réunions régulières.



COMMANDE DE MATÉRIEL

Il est à souligner que les services d'Eurotunnel ont approvisionné très rapidement les équipements destinés aux travaux de réparation, alors que le diagnostic final n'était pas encore établi. Compte tenu des délais de livraison et afin d'éviter toute rupture de stock gravement préjudiciable aux délais de remise en état, cet approvisionnement a dû être réalisé avec une certaine marge d'appréciation.

MISE EN SÉCURITÉ PAR BOULONNAGE

Principes

Le clouage réalisé répondait à la mise en sécurité du personnel de chantier et au serrage des terrains pour garantir la stabilité de l'ouvrage :

→ Clouage des voussoirs pour éviter leur chute ;

→ Clouage du terrain dans les parties où les voussoirs très fracturés ne garantissaient plus la stabilité du massif.

Les boulons (ou clous) n'avaient plus d'utilité dès lors que la voûte en béton était reconstituée.

Par expérience, la dimension des clous (longueur de 3 m) était calée au 1/3 du diamètre de l'excavation initiale du tunnel. Leur densité permettait de reprendre environ 1 bar de pression soit 10 t/m², soit environ 1 boulon de diamètre 20 mm par m². Les boulons utilisés étaient de type Mix Bolt type BCH de diamètre 22 ou 20 mm.

Un relevé géométrique a été régulièrement réalisé pour détecter tout mouvement de la structure. Les résultats ont montré que les convergences tout au long du chantier sont restées inférieures à 2 mm, c'est-à-dire dans la tolérance de mesure. Le mouvement du massif de la craie, qu'on aurait pu craindre initialement, ne s'est pas produit. La qualité du massif a également été confirmée par les essais sur carottage.

Mise en œuvre

Deux trains travaux ont été constitués pour les ateliers de mise en œuvre des clous de confortement de la voûte.

Ces trains ont finalement travaillé depuis chaque extrémité de la zone de génie civil pour se rejoindre vers la zone fortement dégradée.

Chaque convoi comportait un Jumbo équipé d'un marteau Tamrack hydrastar 200 travaillant en roto-percussion, et d'une centrale de malaxage et d'injection des clous (photo 11).

42 postes ont été nécessaires pour la mise en œuvre des 1 072 boulons d'ancrage.

MISE EN PLACE DE LA PISTE

Le respect des délais impartis nécessitait une amélioration significative de la productivité, rendue possible grâce à l'une des innovations principales du chantier : le remblaiement de la voie ferrée et l'aménagement d'une piste routière provisoire, pour faciliter et sécuriser la circulation des hommes et des engins (photo 12). La construction de cette piste a été essentielle ; elle a facilité le déroulement des étapes suivantes du chantier, et favorisé la mise en œuvre de la majeure partie des autres innovations.

Eurovia Travaux Ferroviaires (ETF) a ainsi déversé avec des wagons auto-déchargeables (WAD) 3 500 tonnes de ballast sur le béton de voie entre les trottoirs latéraux, et posé 2 400 traverses de chêne ignifugées pour constituer une piste routière de 630 m de long.

Cette piste réalisée en 12 postes a été dotée d'un quai de déchargement à chaque extrémité.

HYDRO-DÉCAPAGE

Comment décapier 12 000 m² de voûte en 21 jours en industrialisant cette tâche particulièrement pénible lorsqu'elle est réalisée manuellement ?

La deuxième innovation du chantier apporte la solution : l'hydro-décapage pour lequel 5 robots de type Conjet ont été mobilisés (photo 13). Grâce à la piste, les robots pouvaient facilement se déplacer sur l'ensemble de la zone de travaux.

Les hautes pressions des jets et la vitesse d'avancement des robots ont été adaptées grâce à des essais de convenance pour que la démolition des bétons dégradés permette d'atteindre un béton sain (enlèvement des zones sonnant le creux et de résistance mesurée au scléromètre < 55 MPa) tout en dégageant les armatures des voussoirs pour répondre aux règles de l'art des réparations en béton projeté (photo 14).

Des travaux de parachèvement à la lance THP (3.000 bars) et au marteau pneumatique ont complété la préparation de surface au droit des joints entre voussoirs.

Les 900 tonnes de gravats ont été extraites lors des phases de maintenance des groupes UHP.

FERRAILLAGE ET BÉTON PROJETÉ PAR VOIE SÈCHE

Pour favoriser la co-activité entre les différents corps d'état et répondre aux enjeux de délais, la pose d'un échafaudage continu de 500 m (3 000 m² de plancher) -permettant l'accès à toute

12- Piste sur voie ferrée.

13- Robot Conjet.

14- Zone avant/après hydro-décapage.

15- Echafaudage continu.

16- Deux portelances de béton projeté.

17- Pose des équipements.

12- Track on railway line.

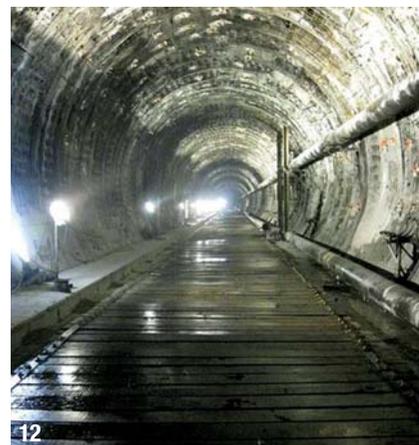
13- Conjet robot.

14- Area before/after hydro-cleaning.

15- Continuous scaffolding.

16- Two shotcrete manipulators.

17- Installing equipment.



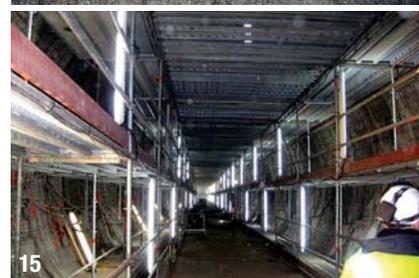
12



13



14



15



16



17



18- Dépose de la piste.

19- Déroulement du câble 21 kV.

20- Tir caténaire.

21- Pose des conduites de cooling.

18- Removal of the track.

19- Unwinding the 21 kV cable.

20- Catenary system.

21- Installing cooling pipes.



LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Plus de 1 000 boulons de 3 mètres de long enfoncés dans les parois et la voûte du tunnel
- Une piste de 630 mètres de long
- 49 tonnes de ferrailage
- 4 000 tonnes de béton projeté
- 1 800 mètres de tuyaux fixés
- 30 kilomètres de câbles électriques, fibres optiques et de fil caténaire
- 1 500 m de rails remplacés en une seule journée
- Près de 60 millions d'euros de travaux

la surface de la voûte tout en autorisant la circulation du personnel et des engins en toute sécurité- est préférée à la mise en œuvre des plates-formes initialement prévues (photo 15).

La troisième innovation du chantier est une des clefs du succès de l'opération. Elle n'a aussi été possible que grâce à la piste routière provisoire.

Des relevés manuels ou par scanner ont confirmé le tonnage de béton à mettre en œuvre, soit 4 000 tonnes.

L'engagement de réaliser un chantier « hors poussière » a motivé l'entreprise à innover avec la conception et la fabrication des ateliers de béton projeté et de transport des matériaux, répondant aux contraintes de délais. Cette « usine » à béton est la quatrième innovation du chantier.

Trois silos de stockage ont été installés dans le tunnel en extrémité de piste côté France ; ils sont approvisionnés par pulsage depuis un wagon-citerne EVS de 80 t, et de là, le matériau sec est acheminé sur 450 m, également par pulsage depuis un container atelier comprenant une trémie de 10 m³ et deux Alivas 263, jusqu'aux deux ateliers de béton projeté qui progressent depuis l'extrémité du chantier côté Angleterre en suivant les ferrailleurs.

Chaque atelier de projection est équipé de 2 machines type Aliva 263, d'un silo tampon de 3 tonnes et d'un dispositif de dépoussiérage et de récupération des fines. L'ensemble de la chaîne de transport des bétons est automatisée et ne nécessite que la présence d'un machiniste par atelier.

Préalablement à la mise en œuvre du béton, le ferrailage des voussoirs est reconstitué dans les zones endommagées et complété pour mettre en place un maillage de 12 cm x 12 cm pour compléter le ferrailage existant et ponter les joints de voussoirs.

Ces 49 000 kg d'armatures de diamètre 8 ou 12 mm ont été posés manuellement et ont nécessité la pose de 39 000 connecteurs et épingles.

Des gabarits sont posés sur le ferrailage et contrôlés par un géomètre pour respecter les tolérances géométriques du gabarit ferroviaire.

Le béton projeté à la lance de 50 est mis en œuvre par passe de 10 à 12 cm sur des épaisseurs de 10 à 40 cm avant réalisation d'une couche de finition de 3 cm dressée à la règle.

Les distances de projection sont limitées à 120 m de part et d'autres des ateliers de béton projeté ce qui nécessite le déplacement de ces équipements en

cours de chantier pour la réalisation des 760 m de travaux.

Les 4 000 tonnes de béton nécessaires à la reconstitution des 10 000 m² de voûte et piédroits ont été mises en œuvre en 100 postes de travail (photo 16).

Les anneaux sont reconstitués par groupes de 3, un sciage annulaire matérialise les zones de fissuration privilégiées non ferraiillées et des forages de décharge sont réalisés en piédroit pour limiter la pression hydrostatique sur la voûte reconstituée.

La technique du béton projeté par voie sèche s'est encore une fois avérée la plus adaptée pour ce type de réparations en tunnel, à 11 km de l'air libre, pour répondre aux contraintes de délais, de performance des bétons et de géométrie de la structure.

La pose des supports d'équipements a eu lieu dès la prise du béton, à 2 jours (photo 17).

RETRAIT DE LA PISTE

Cinq jours ont été nécessaires pour la dépose de la piste dès la fin des travaux de génie civil. ETF a mobilisé des wagons WAD auto-chargeables et un atelier suceur affrété depuis l'Autriche (photo 18). Cette opération a été réalisée en deux temps afin de réduire les délais, en favorisant l'accès des trains travaux côté UK durant la fin des travaux de génie civil côté France.

POSE DES ÉQUIPEMENTS

Les supports d'équipements ont été posés à partir de l'échafaudage dans la continuité immédiate du chantier de béton projeté. La pose des équipements proprement dite a été réalisée à partir de moyens ferroviaires après le retrait de la piste :

→ Déroulement des câbles 21 kV (photo 19),

→ Tirs caténaire (photo 20),

→ Pose des conduites de cooling par longueur de 96 m ayant nécessité la mise au point de matériel spécifique (photo 21). C'est la cinquième innovation du chantier.

CONTRÔLES, ESSAIS ET RÉCEPTION

Un suivi 24h/24h a été assuré pendant ces travaux.

En ce qui concerne le béton, tous les projeteurs ont passé une certification Asquapro au démarrage du chantier. Des caisses de béton projeté ont été réalisées et les carottes extraites de ces caisses ont été écrasées à 2, 7, 14 et 28 jours durant l'exécution de l'opération de projection. Une campagne de prise

de carottes sur le revêtement achevé a été réalisée afin d'exécuter des essais de compression à 28 jours ainsi que des essais d'adhérence.

En ce qui concerne les équipements, les procédures de tests intermédiaires, d'essais de réception partielle, d'acceptation et d'achèvement se sont appuyées sur les procédures d'origine (construction), ajustées lors de la réparation de l'intervalle 3 en 1997, ou pour les activités de maintenance.

Enfin, des véhicules de test à l'achèvement ont circulé :

→ Véhicule d'enregistrement Mauzin, pour le contrôle de la voie,

→ Véhicule gabarit, pour le contrôle de la géométrie.

Une instrumentation à long terme a été mise en place pour suivre les déformations de la voûte : 9 capteurs à corde vibrante avec suivi électronique et cibles topographiques.

ORGANISATION

Dès le départ, la réflexion s'est portée sur le développement d'une méthodologie innovante permettant l'industrialisation des process. La réussite d'un tel projet est aussi le résultat, à la fois des performances techniques réalisées par les entreprises et d'une organisation optimale de l'ensemble des acteurs mobilisés autour d'un même objectif. Ce sont tout d'abord des moyens humains conséquents qui ont été mobilisés sur le chantier en trois postes, sept jours sur sept, y compris les fêtes de fin d'année. Il s'agit ensuite d'un projet intégré autour d'une collaboration très étroite entre maître d'ouvrage, maître d'œuvre et entreprises, rassemblés sur une même base-vie.

« LA RÉUSSITE D'UN TEL PROJET EST LE RÉSULTAT DES PERFORMANCES TECHNIQUES RÉALISÉES PAR LES ENTREPRISES MAIS AUSSI D'UNE ORGANISATION OPTIMALE DE L'ENSEMBLE DES ACTEURS »

La communication était volontariste avec une réunion de coordination quotidienne (week-end et jours fériés compris), voire deux réunions par jour pendant les phases de lancement. Si chacun a su conserver son rôle et sa place dans l'organisation, les délais ont fortement poussé les acteurs à travailler ensemble sur la mise au point des techniques de réparation, des procédures et l'organisation dans l'espace et le temps des différents travaux.

Plusieurs facteurs ont largement contribué à la tenue des objectifs de délais :

→ Le retour d'expérience des acteurs de l'incendie de 1996 ;

→ Les commandes des fournitures critiques (câbles 21 kV, 3.3 kV,...), anticipées par Eurotunnel avant même la signature des marchés de travaux ;

→ Les pré-diagnostics permettant de caler les commandes de béton et d'équipements ;

→ Les réunions de coordination quotidiennes où sont abordées les questions de sécurité, et d'avancement ;

→ Une cellule de coordination et de sécurité en charge de définir et d'optimiser la logistique dont l'agencement des trains du chantier ferroviaire en tunnel ;

→ La coordination et la mise au point sur le terrain des techniques pratiques de mise en œuvre, entre maître d'œuvre et entreprises, sous l'œil averti des spécialistes d'Eurotunnel ;

→ La coordination entre les bureaux où se mûrissent les décisions et le chantier à 11 km à l'intérieur du tunnel ;

→ La coordination au sein du groupement d'entreprises entre le génie civil et les équipements ;

→ La tenue régulière de réunions sur la sécurité des opérations de chantier ;

→ Des réunions hebdomadaires du Comité de sécurité de la Commission intergouvernementale (CIG) qui ont permis d'informer régulièrement les experts du déroulement des travaux. Cela a été un atout pour le traitement serein des questions techniques à l'avancement et la remise en service de l'infrastructure.

CONCLUSION

Eurotunnel recherche et met en œuvre de nouveaux moyens pour éviter un nouvel incendie dans le tunnel sous la Manche, notamment en sensibilisant les chauffeurs routiers aux sources potentielles d'incendie. Plus encore, Eurotunnel a décidé de renforcer les défenses du tunnel contre le risque incendie en y installant un dispositif permanent d'extinction automatique : les stations « SAFE » (Station d'Attaque du Feu). Première mondiale en tunnel ferroviaire, ces quatre stations en tunnel seraient capables de détecter précisément l'étendue d'un incendie sur un train, générer un brouillard d'eau ciblé et préserver ainsi les Navettes et la structure même du tunnel. Un projet volontariste, innovant, appelant le savoir-faire d'entreprises européennes reconnues et nécessitant une ingénierie pointue qui intègre la complexité de l'environnement du site. Les premiers essais devraient démarrer au début de l'année 2010. □

LES EFFECTIFS

Au total, plus de 800 hommes ont travaillé sur le chantier.

À noter qu'aucun accident de travail majeur n'est à déplorer.

ABSTRACT

REPAIRING THE CHANNEL TUNNEL FOLLOWING THE SEPTEMBER 2008 FIRE IN LESS THAN FOUR MONTHS

CHRISTIAN MAQUAIRE, EUROTUNNEL - PHILIPPE ZANKER, FREYSSINET - VÉRONIQUE MAUVISSEAU, SETEC - MICHEL KAHAN, SETEC

On 11 September 2008, the fire that broke out on board a railway shuttle carrying lorries in the northern tube of the Channel Tunnel, 11 km from the portal in France, damaged the concrete roof over a length of 760 metres (very seriously on a section of about one hundred metres), requiring the replacement of appurtenances over about 2 km. Eurotunnel rapidly restored operations in the link between the continent and the United Kingdom by organising train traffic in the five tunnel sections not affected by the fire, then performed dismantling of the burnt shuttle and clearing of the damaged area. At the same time, Eurotunnel hired the services of Setec for project management and Freyssinet leading a consortium of companies of the Vinci group for the repair works. □

REPARACIÓN DEL TÚNEL BAJO LA MANCHA TRAS EL INCENDIO DE SEPTIEMBRE DE 2008, EN MENOS DE CUATRO MESES

CHRISTIAN MAQUAIRE, EUROTUNNEL - PHILIPPE ZANKER, FREYSSINET - VÉRONIQUE MAUVISSEAU, SETEC - MICHEL KAHAN, SETEC

El 11 de septiembre de 2008, el incendio que se declaró a bordo de un tren lanzadera que transportaba camiones en el tubo norte del túnel bajo la Mancha, a 11 kilómetros del portal Francia, ha deteriorado la bóveda de hormigón sobre una longitud de 760 metros (muy gravemente sobre un tramo de un centenar de metros), y ha precisado el reemplazo de los equipamientos sobre aproximadamente 2 kilómetros. Eurotunnel ha vuelto a poner en servicio rápidamente el enlace entre el continente y Gran Bretaña, organizando la circulación de los trenes en los cinco intervalos del Túnel que no fueron destruidos por el incendio, y a continuación ha procedido al desmantelamiento del tren incendiado y a la limpieza de los escombros de la zona deteriorada. En paralelo, Eurotunnel se ha beneficiado de los servicios de Setec para la dirección de obras y de Freyssinet que ha encabezado una agrupación de empresas del grupo Vinci para los trabajos de reparación. □

LA GALERIE DE CHOULLY, UNE GALERIE DE TRANSPORT DES EAUX USÉES ENTRE LA FRANCE ET LA SUISSE

AUTEUR : JEAN-NOËL LASFARGUE, DIRECTEUR COMMERCIAL, CSM BESSAC

LE PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES ET PLUVIALES DE LA COMMUNAUTÉ DE COMMUNES DU PAYS DE GEX (CCPG), DANS L'AIN, PRÈS DE LA FRONTIÈRE SUISSE, COMPREND LE TRANSFERT DES EAUX DES BASSINS D'ASSAINISSEMENT DES RIVIÈRES L'ALLONDON ET LE JOURNANS (SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS) EN VUE DE LEUR TRAITEMENT, À LA NOUVELLE STATION D'ÉPURATION DU BOIS-DE-BAY, SITUÉE EN TERRITOIRE SUISSE. LA CONSTRUCTION DE LA GALERIE DE CHOULLY EN SUISSE S'INSCRIT DANS CE PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT.

Il s'agit d'une importante opération d'assainissement impliquant une réorganisation coordonnée et cohérente des réseaux d'amenée des eaux, tant sur le territoire français que sur le territoire suisse. Ceci a conduit les autorités locales au lancement de plusieurs appels d'offres de travaux :

→ Sur le territoire suisse, la construction du réseau de raccordement « Galerie de Merdisel » acheminant les eaux à traiter jusqu'à l'entrée de la station d'épuration (STEP) ;

→ Entre la France et la Suisse, la construction du réseau de raccordement reprenant les eaux usées et pluviales françaises par une galerie construite sous la colline de Chouilly jusqu'au collecteur primaire du Nant d'Avril (en Suisse). Il s'agit d'un ouvrage visitable de 2,50 m de diamètre et 2 300 m de long, creusé au tunnelier ;

→ Sur le territoire français, la réalisation de nouveaux collecteurs intercepteurs.

Le présent article traite de la construction de la galerie de Chouilly qui a été attribuée à un groupement d'entreprises : CSM Bessac (mandataire) et Implenia.

UN CONTEXTE TRANSFRONTALIER INÉDIT

Il s'agissait, en effet, de construire un ouvrage situé sur les territoires français et suisse, financé par des fonds publics français. Il a donc été nécessaire, aux élus locaux, de trouver une entité juridi-

que qui puisse assurer le rôle de Maître d'ouvrage. Une structure appelée Groupement local de Coopération transfrontalière (GLCT) a donc été créée. Il s'agit d'un organisme regroupant un maître d'ouvrage français, en l'occurrence la CCPG (Communauté de Communes du Pays de Gex), et un maître d'ouvrage suisse, le département du Territoire de Genève (Service des Constructions Environnementales). Le GLCT est une personne morale qui est soumise au droit applicable aux établissements publics de coopération intercommunale de la partie où il a son siège, à savoir, dans le cas présent, la France. Le Maître d'ouvrage est donc une collectivité publique de droit français. Dans ces conditions, l'appel d'offres pour le marché de travaux a été lancé selon le Code des marchés publics français. Cette gestion transfrontalière a dû être abordée avec la plus grande diplomatie vis-à-vis des services douaniers. En effet, le tunnel a été creusé en majeure partie sous le territoire suisse, depuis la France. Ceci pouvait entraîner des situations parfaitement cocasses, par exemple :

→ Un tunnelier fabriqué en France, qui a passé la frontière en souterrain (donc qui n'est jamais passé à la douane) qui doit revenir en France, et donc franchir la douane en provenance de la Suisse ;

→ Des voussoirs fabriqués en Suisse, qui passent la douane vers la France, pour être finalement posés sur le territoire suisse ;



→ Du personnel français qui va travailler en Suisse sans passer la frontière...

L'OUVRAGE

La galerie a un diamètre intérieur de 2,50 m. Sa longueur est de 2 350 m. Son profil a une pente constante de 3 mm/m. Le tracé présente une courbe au départ, il croise une voie rapide et une route départementale, et passe sous un cours d'eau (avec seulement 2 mètres de couverture). La profondeur maximale sous la colline est de 85 mètres. En plus de la construction de la galerie, les travaux comprennent la réalisation d'un puits de départ amont et d'un puits de raccordement aval. La galerie est équipée en phase définitive d'un radier avec cunette.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

La galerie DN 2500 est implantée très majoritairement dans la molasse rouge du Chattien.

Il s'agit d'une roche tendre à dure, constituée d'une alternance de bancs marneux, marno-gréseux et gréseux dont l'épaisseur ne dépasse généralement pas un mètre. Les changements de faciès sont très rapprochés.

Leurs caractéristiques mécaniques sont variables selon les faciès :

→ Faciès marneux :

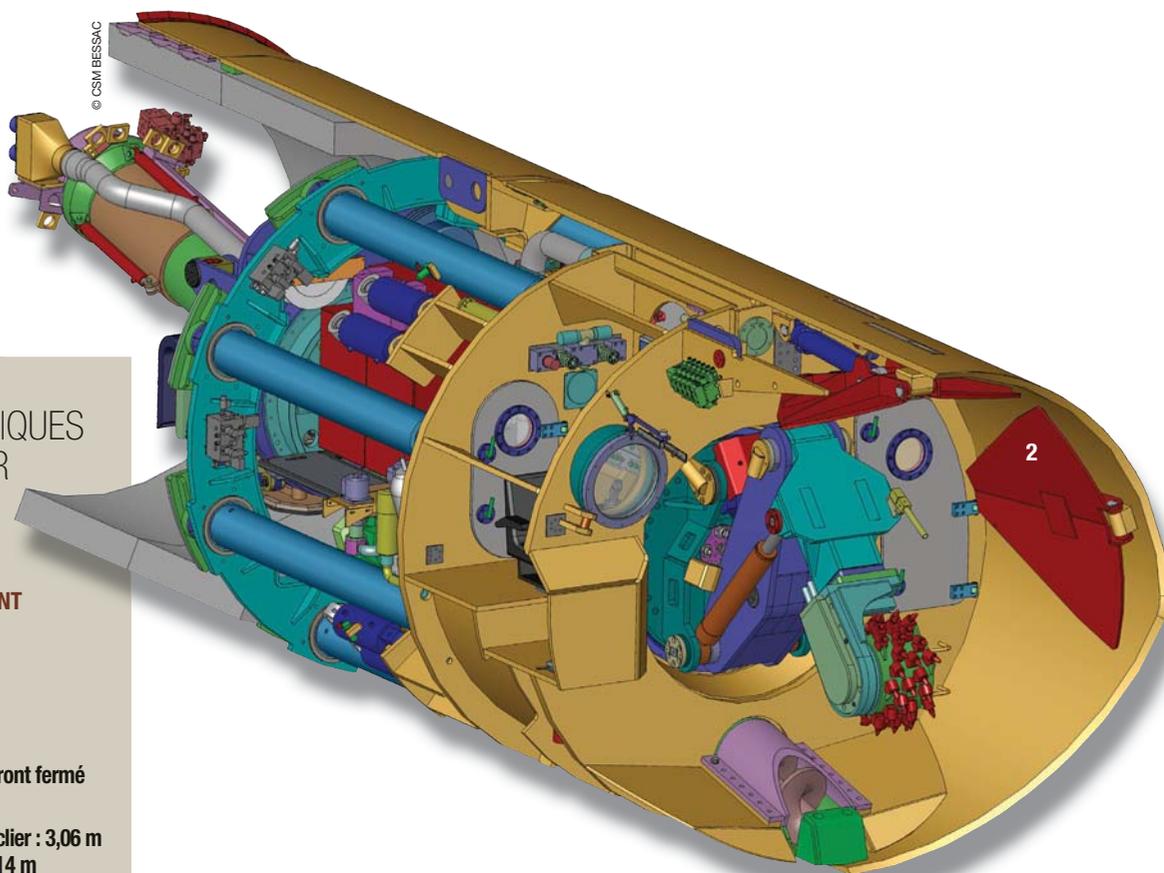
$R_{c\text{moyen}} = 2 \text{ MPa}$ (de 1 à 8 MPa),

→ Faciès marno-gréseux :

$R_{c\text{moyen}} = 6 \text{ MPa}$ (de 3 à 14 MPa),

→ Faciès gréseux :

$R_{c\text{moyen}} = 13 \text{ MPa}$ (de 7 à 37 MPa). ▷



CARACTERISTIQUES DU TUNNELIER

CONSTRUCTEUR
CSM BESSAC

TYPE DE CONFINEMENT
Air comprimé

**PRESSION MAXI
DE CONFINEMENT**
2,5 bars

MODE OPÉRATOIRE
Machine ponctuelle / Front fermé

DIMENSIONS
Diamètre extérieur bouclier : 3,06 m
Longueur hors tout : 9,14 m

MASSE TOTALE
63 tonnes

RAYON COURBE MINI
60 m (sans train suiveur)

POUSSÉE
8 vérins sur patins indépendants
Poussée maxi : 10 000 kN
Course des vérins : 1 800 mm

ARTICULATION
8 vérins

ABATTAGE
Bras compas télescopique à
rotation totale
Outil d'abattage : godet ou fraise

CONVOYEUR À VIS
Diamètre : 425 mm
Longueur : 8,1 m
Capacité : 70 m³/h

ÉRECTEUR
Type central avec préhension
des voussoirs par vide

SAS
Sas double intégré
(volume du sas principal : 3 m³)

ÉTANCHÉITÉ DE JUPE
Trois rangées de brosses
métalliques

OBTURATION DU FRONT
Trois volets métalliques

PUISSANCE TOTALE INSTALLÉE
220 kW

REVÊTEMENT
Voussoirs BA universels à joncs,
5 éléments + clef
DN : 2 500 mm
Longueur anneau : 1 200 mm

2- Schéma
du tunnelier.
3- Le tunnelier
construit par CSM
Bessac.
4- Dans le train
suiveur.
5- Le train de
marinage dans
le puits de départ.
6- La galerie
terminée.

2- Diagram
of the tbm.
3- The tunnel
boring
machine built
by CSM
bessac.
4- In the backup
train.
5- Mucking
train in
starting shaft.
6- Completed
gallery.



Le faciès gréseux présentant des fortes duretés s'est avéré être le plus présent. L'abrasivité de tous les faciès est faible. Le départ du tunnel, côté France, a été excavé sur une centaine de mètres, dans les moraines würmiennes⁽¹⁾, sous la nappe phréatique. Il s'agit de faciès limono-argileux à cailloutis consolidés (durs). Ces mêmes terrains ont été rencontrés sur une cinquantaine de mètres à l'autre extrémité de l'ouvrage.

LES PUITES

Les puits ont été réalisés en paroi clouée et béton projeté dans les moraines würmiennes.

Puits de départ

Le puits de départ, côté France, a une longueur de 40 mètres, une largeur de 6 mètres et une profondeur de 6 mètres. Il est situé à proximité d'un cours d'eau et en bordure d'une voie rapide sur la commune de Saint-Genis-Pouilly. La faible couverture de l'ouvrage, au démarrage, a permis de faire un

puits de grande longueur, apte à recevoir deux trains de marinage longs, compatibles avec la forte longueur de la galerie.

Puits de sortie

Le puits de sortie, côté Suisse, est situé dans le vignoble genevois, en contrebas de la route cantonale du Mandement, sur la commune de Satigny.

Celui-ci est intégré dans l'ouvrage de régulation, un ouvrage complexe qui permet la vidange de la galerie lors de sa mise en charge. Celle-ci est en effet utilisée lors des épisodes pluvieux pour le stockage des effluents.

Les dimensions de l'ouvrage de régulation sont de 30 m de long, 12 m de large et 14 m de profondeur.

CREUSEMENT DE LA GALERIE

Le creusement de la galerie a été effectué par un tunnelier construit par CSM BESSAC.

L'analyse des contraintes géométriques, géotechniques et environnementales du

chantier a conduit le Groupement à proposer l'utilisation d'un tunnelier fermé à attaque ponctuelle et confinement par air comprimé associé à un revêtement en voussoirs BA.

Ce choix s'est fait en tenant compte des nombreux avantages de ce type de matériel :

→ Le confinement qui permet :

- De franchir les zones de terrains superficiels (moraines würmiennes) dont les caractéristiques mécaniques sont limitées ;
- Le creusement sous le niveau de la nappe phréatique ou en présence de circulation d'eau ;
- La limitation nécessaire des tassements sous les voiries traversées.

→ L'abattage ponctuel avec l'interchangeabilité des outils :

- Le godet convient pour terrasser les moraines.
- La fraise de 130 kW est parfaitement adaptée au creusement des molasses.

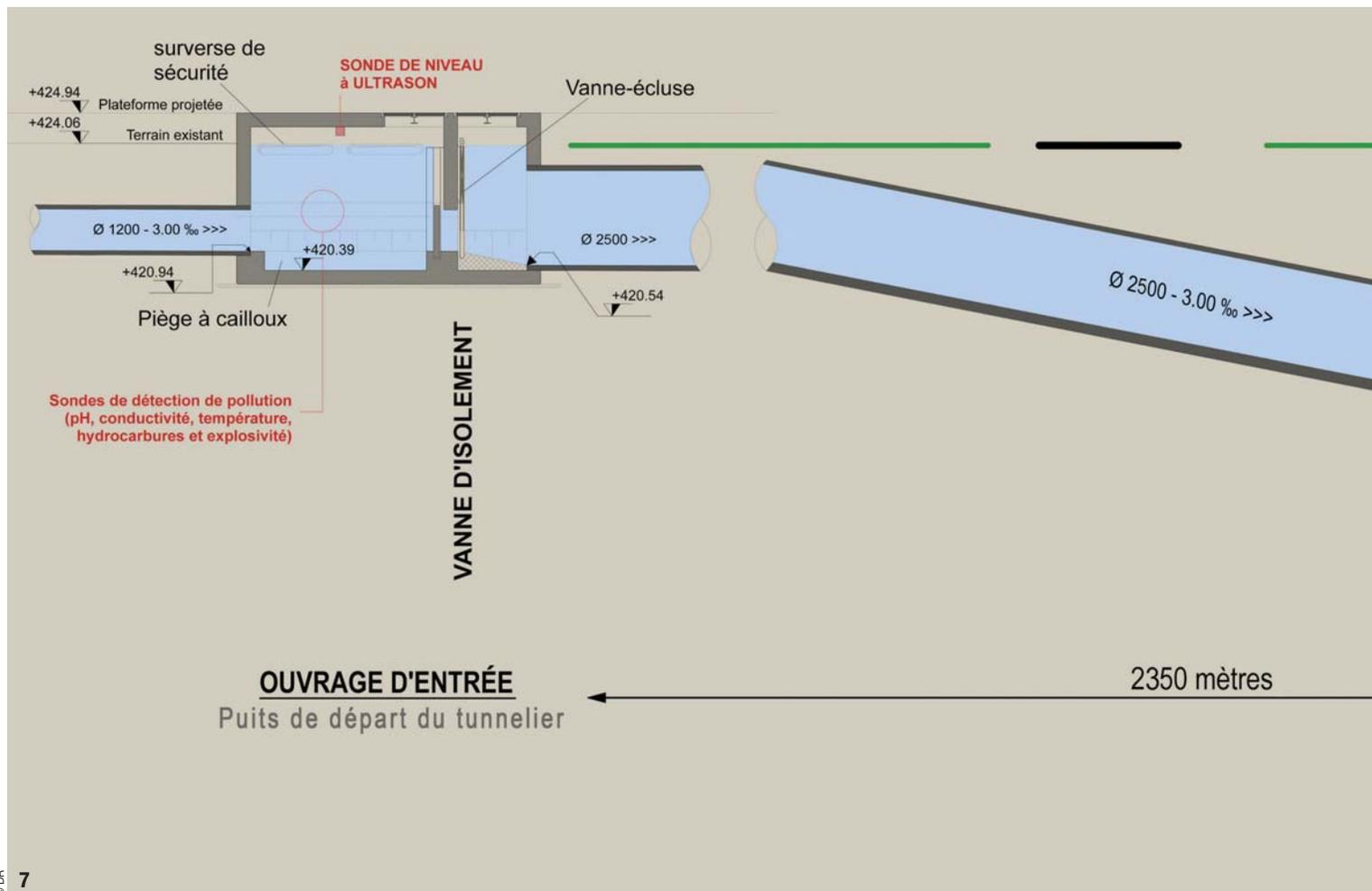
Le revêtement définitif, posé dans le tunnelier, est constitué d'anneaux de voussoirs en béton armé DN 2500, préfabriqués en usine et livrés par transport routier sur le chantier.

Le train suiveur du tunnelier, qui sert d'interface entre ce dernier et le train de marinage, comprenait 7 remorques pour une longueur totale de 37 m.

Les principaux équipements présents sur ce train, tracté par le tunnelier, sont :

- Un tapis convoyeur pour le transfert des déblais entre la sortie de la vis du tunnelier et les bennes du train de marinage ;
- Une rampe motorisée pour le stockage des voussoirs et l'approvisionnement vers l'érecteur ;
- Une pompe d'injection pour le mortier de blocage ;
- Les dispositifs de pompage automatique pour le graissage des organes mécaniques et pour le mastic d'étanchéité du joint de jupe ;
- Les dispositifs de régulation de l'air ▷





© DR 7

de confinement, les télescopes d'air, les enrouleurs de câbles. Le choix du matériel de marinage⁽²⁾ a été fait en tenant compte de la longueur importante de la galerie : Ainsi, 2 trains de marinage ont été utilisés pour l'évacuation des déblais et l'approvisionnement

en voussoirs et mortier d'injection. Ils se croisaient dans le puits de départ. Ils étaient composés d'une loco électrique, de 4 bennes à déblais de 4 m³, et de 3 remorques pour le transport du personnel, du mortier d'injection et des voussoirs. Longueur totale du train :

35 m. Cette longueur importante a déterminé la longueur du puits de départ. Le tunnelier s'est montré parfaitement adapté aux contraintes du projet. Le confinement de la chambre d'abat-tage par air comprimé a permis de s'affranchir des venues d'eau rencontrées, au départ dans les moraines (passage sous un ruisseau), et à la fin du tracé dans les molasses (forts débits provenant d'une faille).

Au-delà de 2,50 m de diamètre, la solution des tunneliers à voussoirs n'a pas ou peu d'alternative, il reste à faire le choix du mode d'abatage approprié à la géologie, abatage global ou ponctuel, avec ou sans confinement. Les techniques sont fiables et maîtrisées. Ainsi CSM BESSAC vient de réaliser 10 km de collecteur de 3,75 m de diamètre à Bogota (Colombie) avec un tunnelier à pression de terre, en un peu moins de 18 mois.

Entre 2 m et 2,50 m, le choix entre microtunnelier ou tunnelier est conditionné le plus souvent par l'environnement de l'ouvrage, qui détermine la possibilité de réaliser les puits. Dans le cas de la galerie de Chouilly, qui fait l'objet de cet article, il n'était en effet pas pensable de réaliser un fonçage de 2 300 m de long, et la forte profondeur compromettrait la réalisation de puits intermédiaires. Le tunnelier à voussoirs s'est donc imposé. Un autre exemple avec un chantier en cours à Annecy (SILA) où les 1 500 m de collecteur Ø 2,28 m sont réalisés avec un tunnelier à voussoirs à partir d'un puits central. Ici le microtunnelier n'était pas utilisable à cause de la présence de courbes de rayon faible (100 m).

TUNNELIER OU MICROTUNNELIER ?

Ces deux types de matériels permettent la réalisation d'ouvrages circulaires en souterrain. Ils assurent le creusement du terrain, son confinement, son évacuation (marinage) et enfin la mise en place du revêtement définitif de l'ouvrage.

Les microtunneliers sont pilotés depuis la surface, il n'y a pas d'opérateur dans la machine. L'abatage est donc nécessairement fait par une roue (abatage global). Le revêtement est constitué de tuyaux préfabriqués mis en œuvre par fonçage à partir du puits de départ.

Le microtunnelier progresse dans le terrain à l'avant de la conduite foncée. L'absence d'opérateurs permet de proposer des machines de faibles diamètres (à partir de 500 mm)

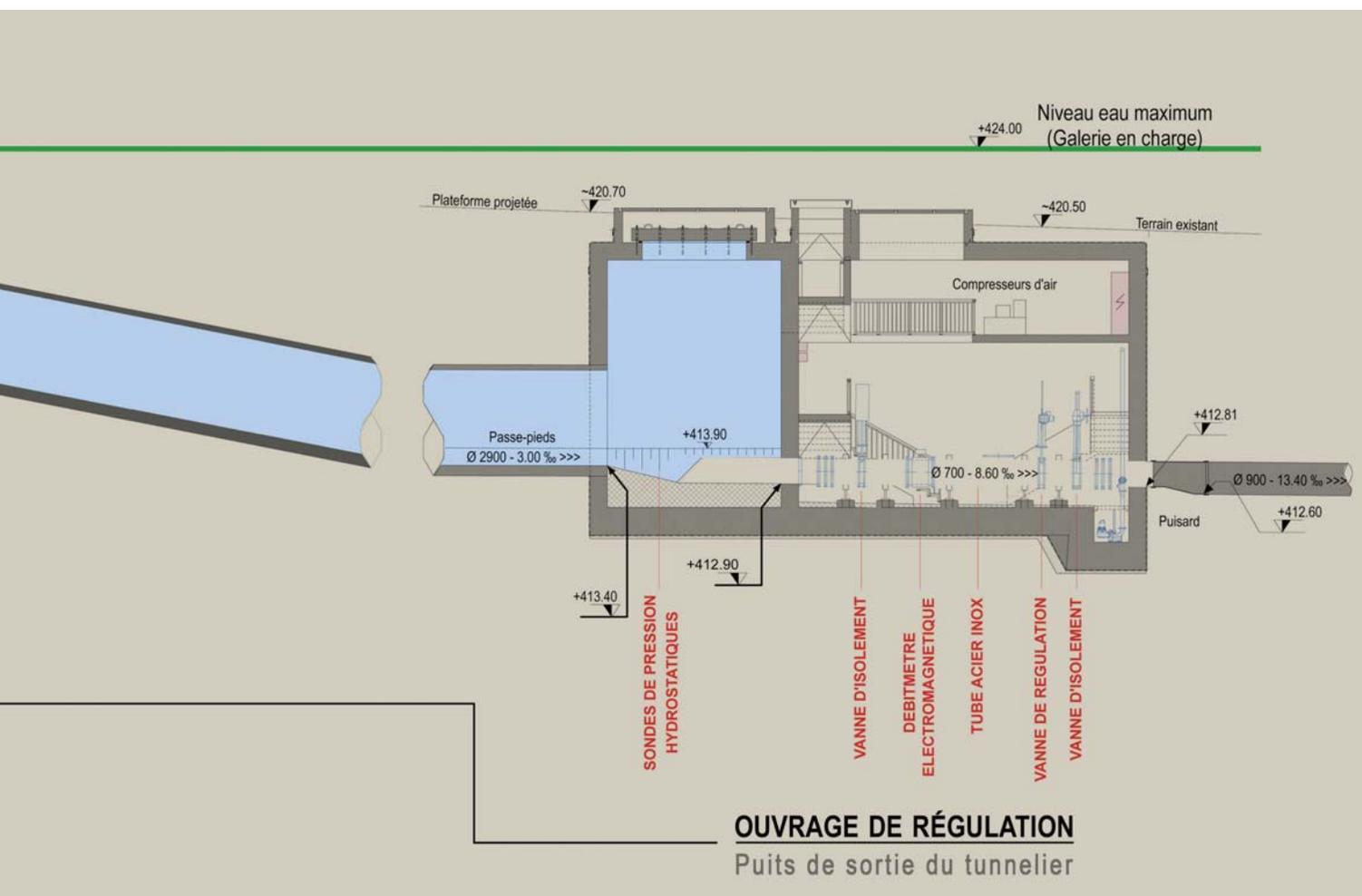
Les tunneliers sont pilotés par des opérateurs présents dans la machine. Ainsi l'abatage peut être fait par une roue ou par un bras (abatage ponctuel). Le revêtement, le plus souvent constitué de voussoirs préfabriqués, est posé dans la partie arrière du tunnelier.

Celui-ci s'appuie sur le revêtement pour progresser dans le terrain.

La présence d'opérateurs dans la machine ne permet pas d'envisager des diamètres inférieurs à 2 m.

LES TUNNELS D'ASSAINISSEMENT : UNE SPECIALITE DE CSM BESSAC

Une des particularités des tunnels d'assainissement est leur faible diamètre qui est le plus souvent inférieur à 5 m. Pour les diamètres inférieurs à 2 mètres, la solution du fonçage au microtunnelier s'impose d'autant que ces dernières années, les limites de cette technique ont été repoussées. Les longueurs de fonçages atteignent ou dépassent aujourd'hui le kilomètre. CSM BESSAC a réalisé, récemment, plusieurs chantiers de ce type (Lyon 964 m Ø 2 m, Le Havre 940 m Ø 1,80 m, Bogota 1 300 m Ø 2,20 m, ...). De plus, l'évolution des matériels de guidage permet la réalisation de tracés présentant des courbes de grands rayons.



La construction d'un tunnelier à voussoirs de faible diamètre est complexe. Il faut intégrer les mêmes fonctions des gros tunneliers dans un espace extrêmement réduit, tout en garantissant les meilleures performances et surtout, les meilleures conditions de sécurité et d'ergonomie pour les opérateurs. Ce type de tunnelier, en marge de deux catégories, est une spécialité de CSM BESSAC.

Le dernier tunnelier construit dans l'usine de Saint-Jory est un tunnelier Ø 2,50 m, à pression de terre, pour la réalisation d'un collecteur de 1 250 m de long à Charenton (SIAAP – VL9 lot n°1).

En étant positionné exclusivement sur la construction de tunnels de 500 mm à 5 m de diamètre, CSM BESSAC sait proposer pour chaque projet la solution la mieux adaptée. Son double statut de constructeur de matériels et d'Entrepreneur lui permet de développer et de mettre en œuvre des solutions totalement conçues pour répondre aux exigences de ce marché. □

- 1- Relatives à la quatrième et dernière glaciation du quaternaire dans les régions alpines, entre - 80 000 et - 10 000 avant J.-C.
- 2- Opération comprenant le chargement et le transport des déblais provenant de l'abattage.

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE
Groupement Local de Coopération Transfrontalière « Galerie de Chouilly »

MAÎTRE D'ŒUVRE
GEOS - Mandataire d'un groupement de 6 bureaux d'études

ENTREPRISE GÉNÉRALE
Groupement CSM Bessac (Mandataire) - Implenia

7- Schéma du fonctionnement hydraulique.

7- Hydraulic operating diagram.

ABSTRACT

CHOULLY GALLERY TO CONVEY SEWAGE BETWEEN FRANCE AND SWITZERLAND

JEAN-NOËL LASFARGUE, CSM BESSAC

The sewage and rainwater drainage programme for the Communauté de Communes du Pays de Gex (CCPG), in the Ain region of France near the Swiss border, includes the transfer of waters from the Allondon and Journans river drainage basins (on French territory), for treatment in the new Bois-de-Bay wastewater treatment plant, located on Swiss territory. Construction of the Chouilly gallery in Switzerland forms part of this sanitation programme. □

LA GALERÍA DE CHOULLY, UNA GALERÍA DE TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES ENTRE FRANCIA Y SUIZA

JEAN-NOËL LASFARGUE, CSM BESSAC

El programa de saneamiento de las aguas residuales y pluviales de la Mancomunidad de aglomeraciones del País de Gex (CCPG), en el departamento del Ain, en las cercanías de la frontera suiza, incluye la transferencia de las aguas de los depósitos de saneamiento de los ríos Allondon y Journans (en el territorio francés) con objeto de su tratamiento, a la nueva estación depuradora de Le Bois-de-Bay, ubicada en territorio suizo. La construcción de la galería de Chouilly en Suiza se inscribe en este programa de saneamiento. □

LGV RHIN-RHÔNE - BRANCHE EST TUNNEL DE CHAVANNE

AUTEURS : PIERRE-LOIC VEYRON, SETEC TPI, INGÉNIEUR EN CHEF RESPONSABLE DE LA CONCEPTION DU TUNNEL -
JEAN SOUSA, SETEC TPI, INGÉNIEUR TRAVAUX RESPONSABLE DE LA MAÎTRISE D'OEUVRE TRAVAUX DU TUNNEL -
PHILIPPE LEGRAND, TERRASOL, INGÉNIEUR GÉOTECHNICIEN EN CHARGE DE LA CONCEPTION PUIS DU SUVI DES TRAVAUX

LE TUNNEL DE CHAVANNE EST UN TUNNEL MONOTUBE À DEUX VOIES SUR LA BRANCHE EST DE LA LIGNE À GRANDE VITESSE RHIN-RHÔNE À PROXIMITÉ DE BELFORT. IL A FAIT L'OBJET, PRÉALABLEMENT À LA CONSULTATION DES ENTREPRISES, D'UNE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE ET GÉOLOGIQUE PAR TRANCHÉE D'ESSAI, PAR PUIS D'ESSAI DE 23 M DE PROFONDEUR ET GALERIE D'ESSAI DE 20 M DE LONGUEUR. LORS DES TRAVAUX, LA MAQUETTE GÉOTECHNIQUE PRÉVISIONNELLE ISSUE DES ÉTUDES A ÉTÉ CONFIRMÉE (NATURE DES TERRAINS, POSITION DES FAILLES). DU FAIT D'UN PLANNING GÉNÉRAL GLOBALEMENT TENDU, IL A ÉTÉ NÉCESSAIRE DE DÉBUTER LA RÉALISATION DU REVÊTEMENT AVANT LE PERCEMENT, CE QUI A ÉTÉ UNE SOURCE DE PERTURBATION CERTAINE DES CYCLES DE CREUSEMENT.



La particularité d'une Ligne à Grande Vitesse ferroviaire (LGV) est l'extrême raideur du tracé et du profil en long. Là où une autoroute, telle que l'A36, pourrait sinuer et « coller » au terrain naturel, une LGV entre en terre et traverse la colline : ainsi, la nécessité du tunnel de Chavanne s'imposait, même si cette colline ne dépasse pas 120 mètres de hauteur. Une fois cette situation entérinée, il s'agissait de faire en sorte de définir un projet optimisé en bonne intelligence avec les acteurs locaux... puis de le réaliser dans des conditions satisfaisantes.

LA CONCEPTION DU TUNNEL

LONGUEUR DU TUNNEL

La longueur minimale d'un tunnel dépend uniquement de choix techniques. Il s'agit en effet de définir en fonction des terrains rencontrés aux têtes la hauteur de couverture minimale admissible. Ceci est l'objet d'une large analyse multicritère qui intègre principalement les notions de risques techniques des travaux à réaliser

en souterrain ou à l'air libre, de délais de réalisation, de pérennité des ouvrages achevés et de coût global. Ainsi, décaler un tympan afin de disposer d'une large bande de terrain au-dessus est a priori intéressant si l'on ne regarde que les travaux souterrains. En effet, on peut considérer que dès lors, l'ouvrage fonctionne dans un contexte de confinement avec un effet de voûte dans le terrain similaire à celui qu'il aurait eu en pleine terre : plus besoin alors de renforcement du soutènement immédiat, tel que des voûtes-parapluies, qui pallie ce mode de fonctionnement lorsque la couverture est insuffisante. Cependant, la fouille à ciel ouvert devient rapidement très importante et le tympan, dont il faut assurer la stabilité à moyen terme, très haut.

À contrario, prévoir une fouille peu haute conduit à minimiser les travaux préparatoires mais à faire porter au tunnel en souterrain tout le poids de... l'absence de poids, ce qui se traduit par des linéaires importants de soutènement immédiat renforcé et une cadence du creusement lente. Dans des pentes modérées telles que

celles rencontrées à Chavanne (10 % côté Chavanne à l'Ouest et 25 % côté Le Vernoy à l'Est) on obtient rapidement un écart important sur les dimensions de la fouille à réaliser. Au projet, le tympan a été positionné de manière à avoir 8 m au-dessus de la clé pour un diamètre excavé de 12 m. Ce choix n'a pas été modifié lors des travaux. La fouille totale faisait ainsi 25 m de hauteur côté Chavanne et 23 m côté Le Vernoy. Si les fouilles d'accès au tympan sont dimensionnées à long terme, il est tout à fait envisageable de circonscrire strictement le tunnel entre les 2 tympans comme cela a été fréquemment le cas dans le passé ; l'insertion dans le paysage et auprès des populations riveraines n'est pas dans ce cas une grande réussite puisqu'il reste à terme une échancrure prononcée dans le terrain. Réseau Ferré de France, Maître d'ouvrage de la ligne, a adopté, dès le début des études, une démarche différente et a demandé à Setec de se concerter avec les communes de Chavanne et du Vernoy sur ce sujet. L'enjeu côté Ouest était plus important

puisque le tunnel entre en terre dans des larges pâtures peu pentées tandis qu'à l'Est le relief est boisé et plus prononcé. Alors même que le profil en long avait été calé au plus bas pour minimiser l'impact du remblai dans la vallée, il a finalement été convenu de réaliser un faux-tunnel de 190 m de telle sorte qu'à son extrémité, le niveau de la clé de voûte ne soit qu'à 6 m sous le niveau du terrain naturel. Cela a ainsi permis la restitution à l'agriculture d'une surface supplémentaire de près de 18 000 m², la réduction de l'impact du projet sur le paysage local et une protection acoustique efficace pour les habitants de Chavanne. Côté Est, aucun de ces points n'impliquait des enjeux réels et la longueur minimale de faux-tunnel a été retenue, soit 50 m. Le tunnel a donc finalement une longueur de 1 970 mètres, dont 1 730 réalisés en souterrain (figure 2).

SECTION DU TUNNEL

Le rôle du concepteur dans un tunnel est avant tout celui d'un chef d'orchestre : avant d'être un tunnel, l'ouvrage est



1- Pose de l'étanchéité.

1- Placing waterproofing.
© SETEC - TERRASOL

pour son propriétaire une voie de passage fonctionnelle d'un système défini, pour lequel il ne veut pas de souci ultérieur, et peu importe le « réceptacle ». Il faut par conséquent que le concepteur marie dans le projet toutes les spécialités :

- Éléments de géométrie liés aux sections de passage à assurer ;
- Éléments de sécurité définis par les règlements en vigueur (l'ITI 98-300 en l'occurrence) ;
- Équipements ferroviaires ;
- Géologie et géotechnique ;
- Béton et béton armé.

Ces spécialités ne sont pas à traiter indépendamment mais de front, tout en veillant à s'assurer en permanence de l'homogénéité de l'ensemble.

Ainsi, le choix final de la section utile de 80 m², qui permet le croisement de deux trains à 270 km/h dans des conditions de confort tympanique des passagers satisfaisantes, a été retenu au lieu des 100 m² permettant une vitesse de 320 km/h. En effet, la nature des terrains et l'importance de la section excavée (145 m², c'est-à-dire une

« UN PROJET OPTIMISÉ EN BONNE INTELLIGENCE AVEC LES ACTEURS LOCAUX »

hauteur de 12 m) laissaient craindre de grosses difficultés lors des travaux, voire ultérieurement, alors même que RFF considérait que la vitesse nominale de 320 km/h n'avait pas lieu d'être retenue, compte tenu du profil en long de la ligne (le tunnel de Chavanne est au point culminant de la branche Est) et du fait qu'un train sur deux ralentisse à l'approche de la Gare Nouvelle de Belfort-Montbéliard TGV. Une fois la section utile retenue, il s'agit de s'assurer qu'elle peut accueillir les réseaux pour équipements ferroviaires (alimentation-traction, signalisation, télécom et les nombreux réseaux désormais obligatoires pour la sécurité du tunnel). Des trottoirs de 1,60 m de large sont alors nécessaires et cette mise au point requiert une réelle concertation entre génie-civilistes et équipementiers ! Reste alors à dimensionner l'enveloppe. Là aussi, dès lors que les terrains sont un peu difficiles, la tâche est rude, car il s'agit à chaque fois de trouver un optimum technique et économique, notamment en adaptant les diverses sections au terrain rencontré mais sans trop

multiplier les variations, ce qui pénaliserait ensuite le chantier. La section finale retenue est la suivante :

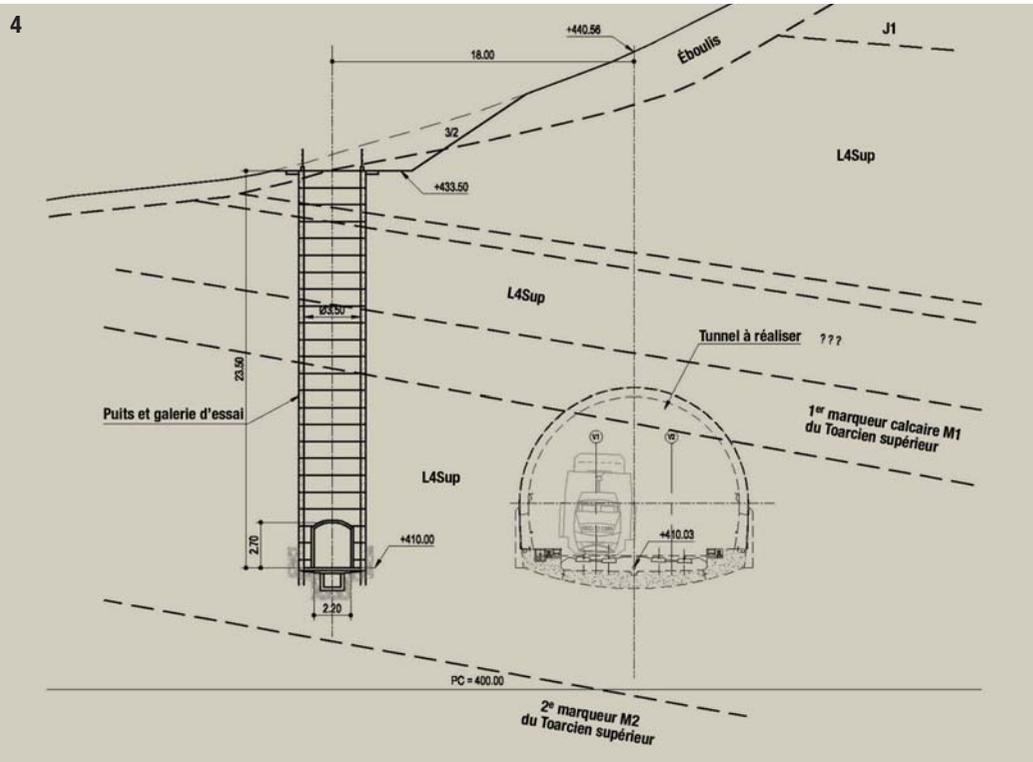
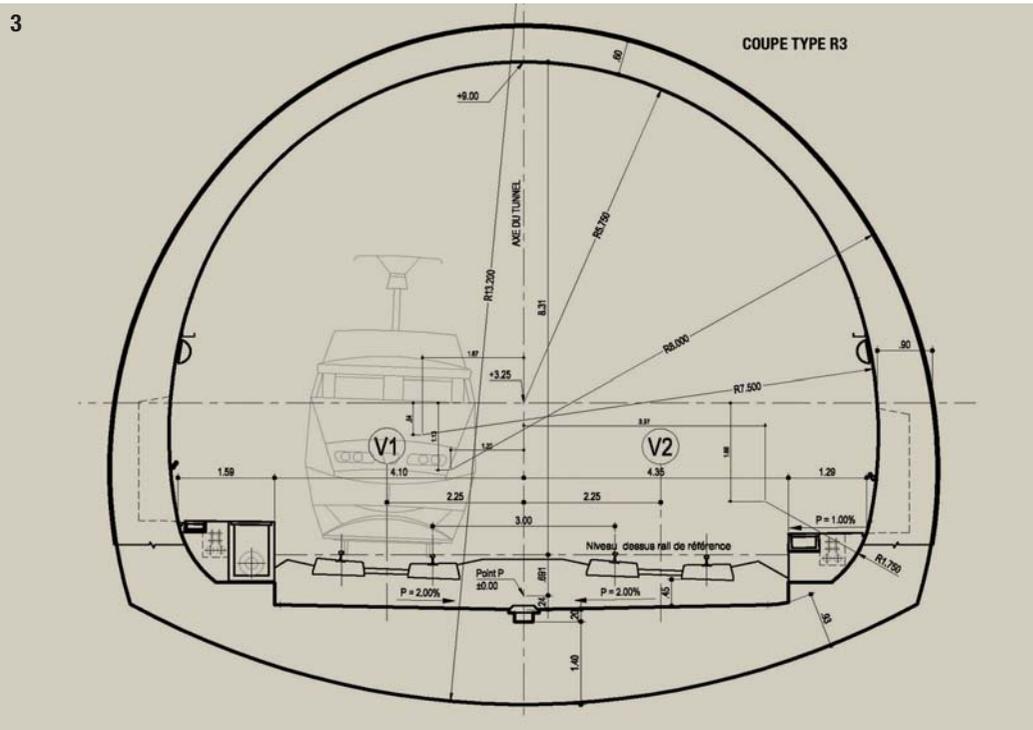
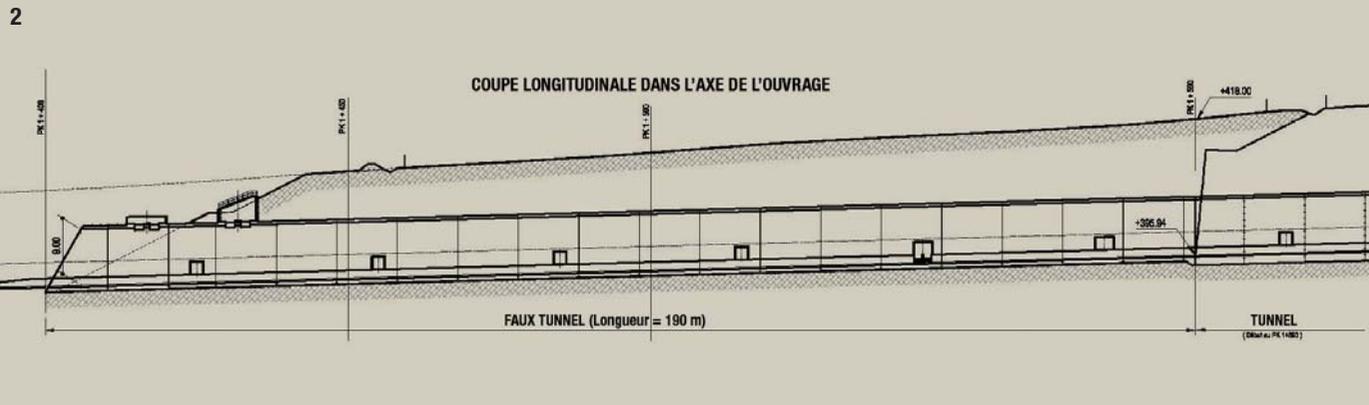
- Rayon intérieur : 5,75 m,
- Hauteur entre dessus de radier et intrados de la clé : 9,24 m (figure 3).

Trois types de revêtement ont été retenus :

- Section R1 valable dans les calcaires avec voûte de 45 à 80 cm et radier de 60 à 85 cm,
- Sections dans les marnes, aptes à reprendre des poussées de gonflement, R2 et R3. Pour R2, voûte de 55 à 90 cm et radier variable de 0,8 à 1,2 m et pour R3 voûte de 0,60 à 1,05 m et radier variable de 0,9 à 1,4 m.

Le radier est ferrailé à un ratio moyen de 75 kg/m³.

Par ailleurs, 5 types de soutènement immédiat ont été retenus au niveau du dossier PRO, allant de la voûte-parapluie à la coque projetée boulonnée, en passant par les cintres réticulés. Ces profils ont été adaptés lors de l'exécution (en particulier l'entreprise a mis en place une section à coque projetée boulonnée au lieu de cintres réticulés).



2- Elévation sur tête Ouest du tunnel.
3- Coupe-type du tunnel.
4- Coupe sur galerie d'essai.

2- Elevation view of the western portal of the tunnel.
3- Typical section of the tunnel.
4- Cross section on test gallery.

DES RECONNAISSANCES GÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES DENSES

Le linéaire du tunnel est de 1 970 m et la couverture maximale est de 100 m. En surface à l'aplomb du tunnel, plus de deux tiers du tunnel sont boisés et d'un accès difficile du fait du relief et du nombre limité de pistes existantes. Néanmoins, compte tenu des éléments géologiques disponibles avant le moindre sondage (carte géologique régionale, identification des affleurements ...) il a paru essentiel d'investir très sérieusement pour disposer du maximum d'informations possibles qui permettraient de réduire les aléas lors du creusement.

Les principaux aléas redoutés étaient les suivants :

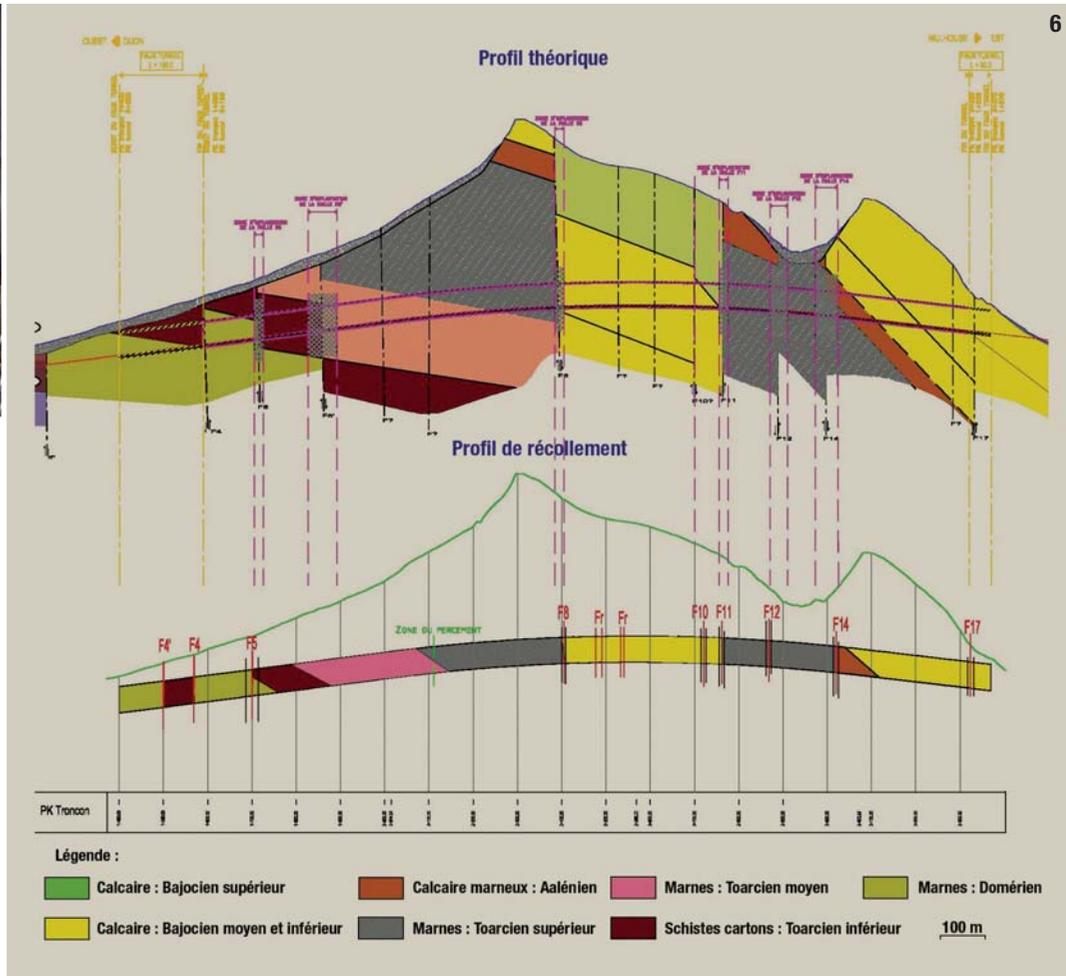
- Comportement et dégradabilité des marnes en tête Ouest dans lesquelles une fouille de l'ordre de 27 m avec paroi clouée était prévue et en souterrain dans les parties sous couverture maximale ;
- Comportement et dégradabilité des marnes en souterrain au droit du col entre les deux compartiments calcaires : une forte tectonisation était à envisager ;



5

5- Radier en cours de réalisation.
6- Comparaison du modèle géologique et des terrains rencontrés.

5- Invert undergoing construction.
6- Comparison of the geological model and the ground encountered.



6

→ Risque de cavités dans les parties calcaires.

Trois campagnes de reconnaissance se sont déroulées lors des études. Du fait des résultats et de l'observation du déroulement des forages, RFF a ensuite accepté les propositions de Setec de faire des reconnaissances en grandeur réelle.

Campagnes de reconnaissances traditionnelles

Préalablement à chaque phase d'études (APS, APD, PRO), il a été défini et réalisé une campagne de reconnaissance par prélèvements et essais sur site et en laboratoire (tableau A).

Ces diverses campagnes ont particulièrement mis en évidence :

→ Le potentiel de gonflement des marnes sans qu'il soit possible de corrélérer ce potentiel à quelquel'autre paramètre que ce soit.

Il a donc été décidé de dimensionner la totalité de la partie de tunnel dans les marnes en tenant compte de ce phénomène, ce qui a conduit à un épaissement de radier en béton armé important (jusqu'à 1,40 m) et de prévoir des dispositions de réalisation spécifi-

ques (usage de l'eau réduit et radier provisoire) ;

→ La grande variabilité des caractéristiques mécaniques des marnes entre les divers niveaux du Toarcien (inférieur, supérieur et moyen) mais aussi à l'intérieur d'un même niveau ;

→ La grande dégradabilité à l'eau des diverses marnes qui se délittent au contact de l'air et de l'eau.

Ce point laissait présager un avancement du front difficile dans la mesure où il était à craindre une mauvaise tenue des boulons et des stabilités de front précaires.

Cette même crainte concernait la tranchée d'accès Ouest pour laquelle il était redouté un mauvais comportement des clous (jusqu'à 25 m de long) était fondamental pour la conception de cette tranchée et était un enjeu très fort pour le début du chantier.

Le risque de rencontres de karsts n'a pas été avéré par les reconnaissances. Par contre, une analyse poussée de la morphologie des calcaires du Bajocien rencontrés et leur comparaison avec d'autres sites proches ont confirmé que

ce risque demeurerait potentiel dans le cadre de ce marché.

Reconnaitances en grandeur réelle

Suite à ces campagnes de reconnaissance, le maître d'œuvre a estimé qu'il était souhaitable, afin de fiabiliser le dossier d'appel d'offres et, à terme, le coût et le planning de construction du tunnel, de réaliser des reconnaissances en grandeur réelle. Deux appels d'offres ont donc été réalisés :

→ Le premier concernait une tranchée d'essai à l'aplomb de la tranchée d'accès tête Ouest. Cette tranchée de 40 m de long, 6 m de large et 8 m de haut a permis de mettre en évidence le comportement satisfaisant des clous dans le Toarcien inférieur et la bonne tenue en grand des talus pentés à 3/2, même si la surface soumise aux intempéries présentait un glissement très local. Ainsi le projet de tranchée d'accès proposé dans le dossier d'appel d'offres du génie civil du tunnel a été validé.

→ Le second concernait la réalisation d'un puits et d'une galerie d'essai dans la zone du col. Le puits a un diamètre intérieur de 3,5 m pour 23 m de pro-

fondeur, tandis que la galerie a une section de 2,50 m par 2,20 m pour 20 m de longueur. Cette galerie est située au même niveau que le tunnel à construire et parallèlement à celui-ci à 20 m de distance en plan. Trois types de soutènement immédiat ont été testés et quelques mètres ont été laissés à nu afin d'observer le comportement de la roche. Un programme de suivi de plusieurs mois et des essais en laboratoire ont été réalisés.

Alors même que dans ce secteur, plusieurs trous de forage s'étaient refermés durant les reconnaissances, laissant présager les pires difficultés de creusement à une plus grande échelle, la galerie d'essai a été réalisée sans difficulté, et le comportement de la roche a été satisfaisant. Ces bons résultats ont malgré tout été pris avec prudence dans le dossier d'appel d'offres.

Lors de l'appel d'offres, ces deux ouvrages de reconnaissances ont été visités par les concurrents et les résultats d'essais associés mis à leur disposition. Cette démarche leur a permis de disposer d'éléments probants pour établir leur offre (figure 4).

TABLEAU A : CAMPAGNES DE RECONNAISSANCE

	APS	APD	PRO
Sondages carottés	8	14	9
Sondages pressiométriques	5	5	2
Principaux essais in situ :			
- Essais dilatométriques	10	14	
- Essais Lugeon	0	33	15
- Diagraphies et mesures en sondages	oui	oui	oui
- Fracturation hydraulique			5
- Piézométrie		oui	oui
- Cellules de pression		oui	oui
Principaux essais en laboratoire :			
- Minéralogique et chimique	Oui	Oui	Oui
- Gonflement œdomètre	3	0	19
- Gonflement Huder-Amberg	5	2	6
- Résistance à la traction	21	17	23
- Rc ou Rc+E	41	48	16
- Triaxiaux	3	6	17

TABLEAU B : BILAN AVANCEMENT ATTAQUE OUEST
LINÉAIRE RÉALISÉ : 522 M SOIT 30 % DE LA LONGUEUR TOTALE

Formations traversées	Linéaire ml	Moyen d'excavation (ml)		Cadences moyennes ml/J
		mécanique	Explosif	
Marne du Domérien	105	71	34	1,14
Zone de transition	85	45	40	1,16
Schistes cartons du Toarcien inférieur	90	-	90	1,90
Zone de transition	42	42	-	1,43
Marnes du Toarcien moyen	200	149	51	1,80
Total	522	307	215	1,47
Soit		59 %	41 %	

TABLEAU C : BILAN AVANCEMENT ATTAQUE EST
LINÉAIRE RÉALISÉ : 1 210 M SOIT 70 % DE LA LONGUEUR TOTALE

Formations traversées	Linéaire ml	Moyen d'excavation (ml)		Cadences moyennes ml/J
		mécanique	Explosif	
Calcaire du Bajocien	650	-	650	4,50
Marnes du Toarcien supérieur	505	177	328	2,20
Marnes du Toarcien moyen	55	-	55	2,80
Total	1 210	177	1 033	3,10
Soit		15 %	85 %	

TABLEAU D : ÉPAISSEUR DES REVÊTEMENTS RÉALISÉS (en mm)

Type de revêtement	APD	PRO
R1	0,85	0,65
R2	1,20	0,68
R3	1,40	1,03

LA RÉALISATION DU TUNNEL

EXCAVATION ET REVÊTEMENT MENÉS DE FRONT

Après 19 mois de travaux et 1 730 m creusés, le percement et la rencontre des deux attaques du tunnel de Chavanne ont eu lieu le 28 janvier 2009.

Compte tenu du planning, l'excavation et le revêtement (radier en béton armé puis voûte) ont été menés de front avec un décalage de 400 m environ avec l'atelier d'excavation.

Afin de permettre l'accès permanent au front de taille, et pour s'affranchir de l'utilisation d'un pont de transfert, la réalisation des plots de radier s'est faite en deux phases (2/3 puis 1/3 de sa largeur).

Ce phasage est très contraignant pour l'ensemble du chantier. Il a eu un impact non négligeable sur les transports en tunnel et sur la durée de marinage des 224 000 m³ excavés (photo 5).

Une géologie conforme au projet

Le creusement d'un tunnel présente souvent des écarts par rapport à la maquette géotechnique prévisionnelle.

Dans le cas du tunnel de Chavanne, la réalisation de reconnaissances importantes en nombre et qualité, programmées et interprétées par Setec et Terrasol, a permis de cibler au mieux la nature et le comportement des matériaux ainsi que les zones de failles au droit des interfaces entre les marnes et les calcaires. Lors du creusement du tunnel de Chavanne, la comparaison entre le modèle géologique et la géologie rencontrée a montré, du point de vue pétrographique, des formations conformes aux données du dossier.

Lors des travaux, les zones de failles identifiées en phase de projet ont été reconnues par la réalisation des sondages de reconnaissances de type carottés au front, qui ont confirmé leur localisation prévisionnelle (figure 6).

De façon générale, ces sondages ont permis d'apprécier la qualité géotechnique des terrains et les venues d'eau. Le soutènement a ainsi pu être adapté ; on notera en particulier que la caractérisation de la faille majeure du projet sous 80 m de couverture a permis une traversée de cette dernière avec



un soutènement de type coque boulonnée. À noter que le contexte « sec » des zones de failles en général a permis une traversée de ces dernières sans problématiques majeures de stabilité.

Le soutènement principalement mis en œuvre est de type coque boulonnée (béton projeté de 15-30 cm avec auréoles de boulons à ancrage continu non scellé, de type Swellex). Seulement 230 ml de profils cintrés (HEB 220 avec un espacement variable de 1-2 m) et 34 ml de voûte parapluie aux têtes de tunnel (12 ml à l'Est et 22 ml à l'Ouest) ont été mis en œuvre. Globalement, le suivi des convergences et nivellements montrent que le soutènement par coque boulonnée assure une bonne stabilité vis-à-vis de la reprise des efforts : les convergences maximales observées sont de l'ordre de 2-3 cm (figure 6).

Des vitesses d'avancement très variables entre les deux attaques

- Un contexte géologique délicat sur l'attaque Ouest

L'excavation s'est déroulée dans un contexte géologique délicat avec en particulier la traversée des marnes du

Toarcien inférieur dits « schistes cartons ». Les marnes du Lias réputées gonflantes ont impliqué des contraintes fortes sur chantier pour prévenir tout gonflement : gestion des eaux, radier provisoire à l'avancement, suivi de nivellement en radier. À ce jour, aucun déclenchement du gonflement n'est observé.

Les difficultés d'ordre géotechnique sont venues du comportement rocheux des marnes pour lesquels des instabilités de type dièdres ont été observées. Ainsi les suintements d'eau, une fracturation de type OR2b et une schistosité stratigraphique marquée dans ces terrains marneux sont à l'origine d'une déstabilisation des blocs (photo 7).

L'entrée progressive dans les marnes du Toarcien inférieur puis du Toarcien moyen en attaque Ouest ont fortement perturbé l'avancement par ces phénomènes d'instabilité en voûte et au front. La stabilité immédiate réduite, malgré les bonnes caractéristiques mécaniques des marnes (absence de convergences) n'a pas permis une mise en cadence de cette attaque (pas d'avancement

variable, pose de présoutènement de type enfilage via des barres autoforantes de 6 mètres, excavation en demi-section). Il en résulte un décalage de la jonction initialement prévue au PM900 de l'attaque Est (ou PM830 de l'attaque Ouest) ; la jonction a été recalée au PM1208 (ou PM522 de l'attaque Ouest) (tableaux B et C).

- Un avancement jusqu'à 5 mètres par jour dans les calcaires de l'attaque Est

En attaque Est, après une excavation à l'explosif au pas de 5 ml sur 300 ml dans les calcaires du Bajocien, la traversée de la « zone du col » (compartiment marneux de 260 ml tectonisé) a confirmé les difficultés attendues puisqu'elle s'est effectuée avec une excavation essentiellement mécanique (passage ponctuel à l'explosif) et une alternance de soutènement de type cintré ou coque boulonnée en fonction des zones de failles rencontrées. Les difficultés étaient en particulier accentuées par les venues d'eau au travers d'un banc calcaire marqueur, repéré en phase études, au sein des marnes. ▷

7- Chute de blocs au front en attaque Ouest- PM 108.

8- Front de calcaire sain.

9- Chargement d'une volée.

10- Projection de béton en cours.

11- Ferrailage de type R2.

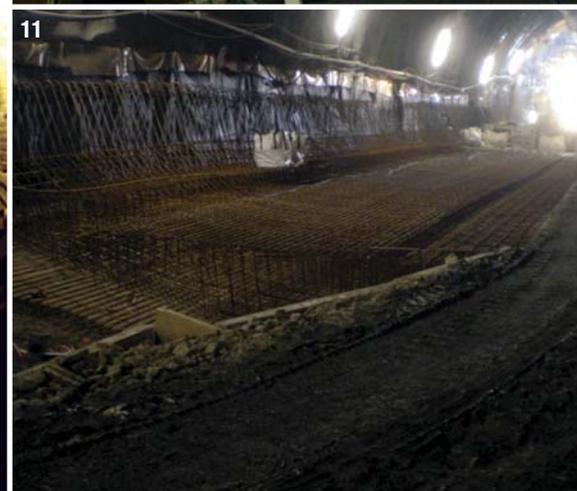
7- Fallen blocks at the western tunnel face - PM 108.

8- Face of healthy limestone.

9- Charging a round.

10- Shotcreting in progress.

11- R2 type reinforcing bars.



VOLUMES MENSUELS DES BÉTONS DE REVÊTEMENT
(YC BÉTON DE BLOCAGE ET TROTTOIRS)



Il est à noter que cette zone concentre la totalité des zones cintrées et d'excavation mécanique de l'attaque Est, alors qu'elle n'en représente que 20 % du linéaire.

En effet, à partir du PM 560, l'excavation s'est poursuivie à l'explosif jusqu'à la jonction, avec des pas allant jusqu'à 5,8 m dans les calcaires du Bajocien (PM 560-917) et jusqu'à 4 m dans les marnes saines du Toarcien supérieur (PM 917-1208) ; le soutènement mis en œuvre est de type coque boulonnée sur l'ensemble de ce linéaire (photo 8).

DES SOLUTIONS TECHNIQUES PERTINENTES

- Utilisation d'une émulsion de type Morse pour l'explosif

Le principe retenu par le chantier pour

exécuté les tirs a été celui de la fabrication au front de taille, au moyen d'une Unité mobile de fabrication d'explosif qui porte le nom de système Morse. Le produit explosif fabriqué -une émulsion (Nitram TX1) résultant du mélange d'une matrice inerte et de deux réactifs- était pompé à front à l'intérieur des trous. Le plan de tir (plutôt constant) comprenait 155 trous et au total, 255 000 kg d'explosifs ont été utilisés soit un ratio moyen de 1,68 kg/m³.

Ce système permet en particulier, d'adapter la charge au front (souplisse d'utilisation) et de charger plus facilement les trous légèrement obturés. Mais l'avantage du Morse réside essentiellement en son caractère non explosif avant mélange à front (produits stockés inertes) - (photo 9).

- Utilisation de fibres en polypropylène dans la formulation du béton projeté

18 000 m³ de béton fibré projeté ont été utilisés pour assurer le soutènement immédiat du tunnel creusé. L'entreprise a proposé en lieu et place des fibres métalliques prévues au marché d'opter pour des fibres en polypropylène. Ces fibres synthétiques ont permis de supprimer la couche de béton projeté non fibré protégeant la membrane d'étanchéité (pas de risque de perforation, contrairement aux fibres métalliques). Pour le chantier, le souci était d'obtenir les mêmes caractéristiques qu'avec des fibres métalliques, notamment pour les résistances à l'écrasement et en flexion/poinçonnement (photo 10). Des essais ont été menés par l'entreprise avec le laboratoire Sigma Béton pour confirmer sans difficulté ces spécifications. Les convenances sur la formulation ont abouti à un dosage en fibres de 7 kg/m³ au lieu des 35 kg de fibres métalliques initialement prévus.

UN REVÊTEMENT DE QUALITÉ

Les premiers bétonnages ont débuté par le faux-tunnel Est (50 ml) en septembre 2007, avec une entrée en tunnel de l'outil coffrant des voûtes en janvier 2008 (fin novembre 2007 pour les radiers). En attaque Ouest, du fait de la réutilisation de l'enveloppe coffrante extradados de l'outil Est, du temps de transfert et de remontage sur l'attaque Ouest, la réalisation des voûtes du faux tunnel Ouest (190 ml) a commencé en mars 2008 (bétonnage des radiers dès novembre 2007) avec une entrée en tunnel en novembre 2008 (juillet 2008 pour les radiers) - (photo 11). Avec le béton de blocage, 30 000 m³

de béton ont été mis en œuvre pour la réalisation du radier, achevée le 8 mai 2009 (tableau D).

Le bétonnage des banquettes est effectué via un outil coffrant spécifique en arrière des radiers.

Pour les voûtes, une formulation de béton adaptée, à base de 350 kg/m³ de ciment CEM III 42.5 PMES, dans l'optique de limiter l'exothermie et le retrait thermique associé, a permis d'obtenir un revêtement de qualité : absence de fissures et uniformité de teinte.

Les voûtes sont réalisées avec deux outils coffrants métalliques autobloquants de 10 m de longueur, équipés d'un système de vibration électrique.

Pour les faux tunnels et les voûtes réalisées en sous terrain 39 000 m³ de béton ont été pompés.

L'étanchéité du tunnel est assurée par la mise en œuvre d'une géomembrane (D.E.G) synthétique à base de PVC-P (photo 1).

Le dispositif proposé par l'Entreprise et son sous-traitant étancheur G.C.C dispose de l'Avis Technique CETU.

Dès la fin du creusement, à partir du 29 janvier 2008, les cadences de bétonnage se sont accentuées.

Ainsi, au mois d'avril 2009, c'est plus de 11 000 m³ qui ont été pompés pour réaliser 250 ml de radier et 240 ml de voûte (figure 12). □

ABSTRACT

RHINE-RHONE HIGH-SPEED TRAIN LINE – EASTERN BRANCH – CHAVANNE TUNNEL

PIERRE-LOIC VEYRON, SETEC TPI - JEAN SOUSA, SETEC TPI - PHILIPPE LEGRAND, TERRASOL

The Chavanne Tunnel is a single-tube two-track tunnel on the eastern branch of the Rhine-Rhone high-speed train line in the region of Belfort. Before tenders were invited from contractors, it underwent geotechnical and geological reconnaissance by a test trench, a test shaft 23 metres deep and a test gallery 20 metres long. During the works, the projected geotechnical model based on the engineering studies was confirmed (nature of the ground, location of faults). Because the overall schedule was generally tight, construction of the lining had to be started before drilling, which definitely interfered with the tunnel driving cycles. □

LGV RIN-RÓDANO – TRAMO ESTE TÚNEL DE CHAVANNE

PIERRE-LOIC VEYRON, SETEC TPI - JEAN SOUSA, SETEC TPI - PHILIPPE LEGRAND, TERRASOL

El túnel de Chavanne corresponde a un túnel monotubo de dos carriles en el tramo Este de la Línea de Alta Velocidad Rin-Ródano en la cercanías de Belfort. Este túnel ha sido objeto, previamente a la consulta de las empresas, de un reconocimiento geotécnico y geológico por unidad de ensayo, por pozos de ensayo de 23 metros de profundidad y galería de ensayo de 20 metros de longitud. Durante los trabajos, se ha podido confirmar la maqueta geotécnica provisional derivada de los estudios (género de los terrenos, posición de las fallas). Debido a una planificación general globalmente inflexible, fue necesario iniciar la ejecución del revestimiento antes de la excavación, lo que ha generado diversas perturbaciones en los ciclos de excavación. □

LE TUNNEL « DIABOLO » SOUS L'AÉROGARE DE BRUXELLES¹

AUTEURS : PHILIPPE VAN BOGAERT ET BART DE PAUW, TUC RAIL BRUXELLES - JOHAN MIGNON, WAYSS UND FREYTAG BENELUX

LE PROJET « DIABOLO » CONSISTE EN UNE NOUVELLE LIGNE DE CHEMIN DE FER RELIANT BRUXELLES À MALINES EN PASSANT PAR L'AÉROPORT INTERNATIONAL DE BRUXELLES À ZAVENTEM. LE PROJET D'EXTENSION DES VOIES FERRÉES EXISTANTES SOUS LES 3 PISTES PRINCIPALES DE L'AÉROPORT COMPREND LA RÉALISATION D'UN TUNNEL BI-TUBE DE 7,30 M DE DIAMÈTRE EXCAVÉ AU TUNNELIER ET DE PLUSIEURS TRANCHÉES COUVERTES, DANS UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE ASSEZ FAVORABLE (SABLES ET PASSAGES DE GRÈS TENDRES). LE CONTRAT DE FORME PPP A PERMIS CERTAINES MODIFICATIONS ET AMÉLIORATIONS DU PROJET PAR RAPPORT AUX SOLUTIONS DE BASE. LE PERCEMENT DU PREMIER TUBE DU TUNNEL A ÉTÉ RÉALISÉ LE 26 JUIN 2009 ET LE SECOND TUBE DEVRAIT ÊTRE ACHEVÉ AVANT LA FIN DE L'ANNÉE 2009.

SITUATION DU PROJET

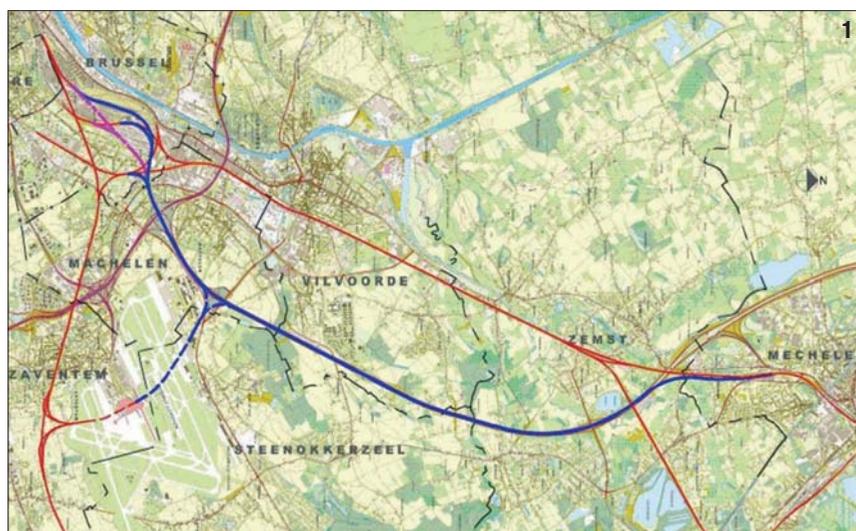
Le projet « Diabolo » est une nouvelle ligne de chemin de fer, reliant l'agglomération Bruxelloise à Malines via l'aérogare Bruxelles National, située dans la commune de Zaventem.

Cette liaison permet le désenclavement de l'aérogare, laquelle n'est actuellement accessible par la route et par la voie ferrée, que par l'agglomération Bruxelloise. Le projet se décompose en plusieurs parties (figure 1).

En bas et à gauche de la figure 1 se trouve l'aéroport de Bruxelles-National, où annuellement 260 000 vols atterrissent ou partent à destination de tous continents. Les lignes rouges sont les connexions ferroviaires actuelles, dont la desserte au moyen d'un minimum de 3 trains par heure en direction de Bruxelles.

Cependant, l'accès par le Sud étant facile, le centre de Bruxelles se trouvant à 8 km seulement de l'aérogare, les voyageurs venant du Nord doivent d'abord descendre vers Bruxelles, pour y prendre un train de correspondance, lequel emprunte la courbe indiquée en rouge, qui les amène dans la gare souterraine.

Le projet « Diabolo » comprend donc le prolongement des voies ferrées sous les 3 pistes d'atterrissage de l'aérogare jusqu'à la berme centrale de l'autoroute E 19, où des branchements dans les directions Nord et Sud seront prévus. Le branchement Sud permet une



1- Situation générale du projet « Diabolo ».

1- General location of the Diabolo project.

connexion plus rapide vers les gares bruxelloises, le branchement vers le Nord donnant accès à la nouvelle ligne, actuellement en construction dans la berme centrale de l'autoroute.

Ces nouvelles connexions sont indiquées en bleu à la figure 1.

La forme de l'ensemble des deux branchements, existant et à construire et la liaison sous l'aérogare, ressemble avec beaucoup de fantaisie, quelque peu au jouet du nom « Diabolo ».

Evidemment, le passage sous l'aérogare est la partie la plus importante du projet. Elle existe en une série de tranchées couvertes et un double tunnel foré au tunnelier.

LES CONDITIONS GÉOLOGIQUES

La géologie du terrain est relativement favorable aux travaux souterrains. Le terrain consiste en un sable du tertiaire, d'une granulométrie fine, contenant des bancs de grès d'épaisseur variable. Cependant, les grès n'ont que des dimensions modestes et peuvent être excavés facilement. À certains endroits, une décalcification des grès s'est produite, occasionnant des creux sous ces horizons. Il existait donc un risque de perte de boue à la bentonite, durant la réalisation de parois moulées ou le forage de tunnels. Ce risque ne s'est jamais manifesté dans la réalité. La couche sablonneuse a une profon-

deur de 35 m et est suivie par une argile compressible, également du tertiaire. Cependant, le tunnel n'atteint pas cette profondeur. Le sable situé au-dessus des bancs de grès est nettement moins compact.

Afin de mieux découvrir les caractéristiques réelles du terrain, un puits de reconnaissance fut réalisé au moyen de fouilles par parois berlinoises. Pendant la réalisation de ce puits, une documentation complète fut établie. Un inventaire complet de la description géologique, des échantillons et une large collection de photos ont ainsi été constitués et remis aux candidats lors de la procédure d'adjudication.

SCHÉMA GÉNÉRAL DU TUNNEL SOUS L'AÉROGARE

Le site du tunnel est montré à la figure 2.

Le bâtiment de l'aérogare, au-dessous duquel se trouve la gare ferroviaire existante, se trouve en bas de la figure. Cette installation est à prolonger de 300 m afin de recevoir des rames de trains internationaux. Dans un stade ultérieur, des voies et quais additionnels pourront être réalisés. Regardant vers le haut de la figure 2, les voies à réaliser passent sous les aires de stationnement, et pistes. Ensuite les voies quittent la zone protégée pour rejoindre la partie 'Brucargo', où sont situés plusieurs entreprises ayant des activités liées au transport aérien.

Ce tronçon est totalement construit en tranchée couverte et scindé en deux directions, l'une vers Bruxelles, l'autre vers le Nord en direction de Malines.

Il est évident que le trafic aérien ne saurait être interrompu pour des périodes considérables et que la construction au moyen d'un tunnelier était la méthode recommandée.

Quant aux autres tronçons du projet, un phasage approprié de la circulation routière, de l'utilisation des aproms et des déviations locales de l'autoroute E 19, permet la réalisation de la connexion par l'utilisation de méthodes classiques. C'est également le cas en ce qui concerne l'extension de la gare souterraine, quoique dans cette zone des terrains pollués par des combustibles et lubrifiants ont été repérés. En outre, les conditions urbanistiques limitent le rabattement de la nappe phréatique à 1 m de profondeur supplémentaire, afin de limiter les influences sur la flore.

TUNNELS

Plusieurs raisons, telles que la sécurité à l'incendie et le désenfumage, ainsi que le profil en long des voies ferrées, incitent à choisir la solution de deux tunnels à diamètre moyen, plutôt que la construction d'un seul tunnel à grand diamètre. Deux tubes à simple voie sont actuellement forés par le tunnelier sous pression de boue à la bentonite. Le diamètre intérieur de ces tubes est de 7,30 m, le diamètre extérieur de la machine étant de 8,30 m. La nappe phréatique est située à environ 2 m au-dessus de l'arête supérieure du tunnelier. Les anneaux, constituant le revêtement du tunnel, sont composés de 7+1 voussoirs préfabriqués ayant une épaisseur de 0,35 m. La figure 3 montre une simulation du trajet du forage, sous l'aire de circulation des avions, puis sous la piste d'atterris-

sage et ensuite sous le hangar N° 117 d'entretien au fond de la photo.

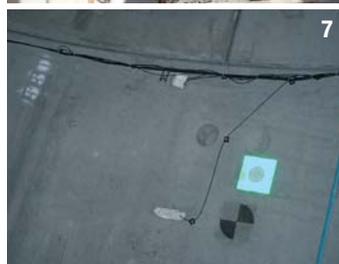
Le projet ayant fait l'objet d'un contrat PPP, avec financement en-dehors du cadre de l'entreprise, le dialogue technique a conduit à des modifications du projet de référence, tel qu'il avait été établi déjà en 2006. A l'exception d'une seule, ces modifications ne concernent pratiquement que les tronçons du type classique.

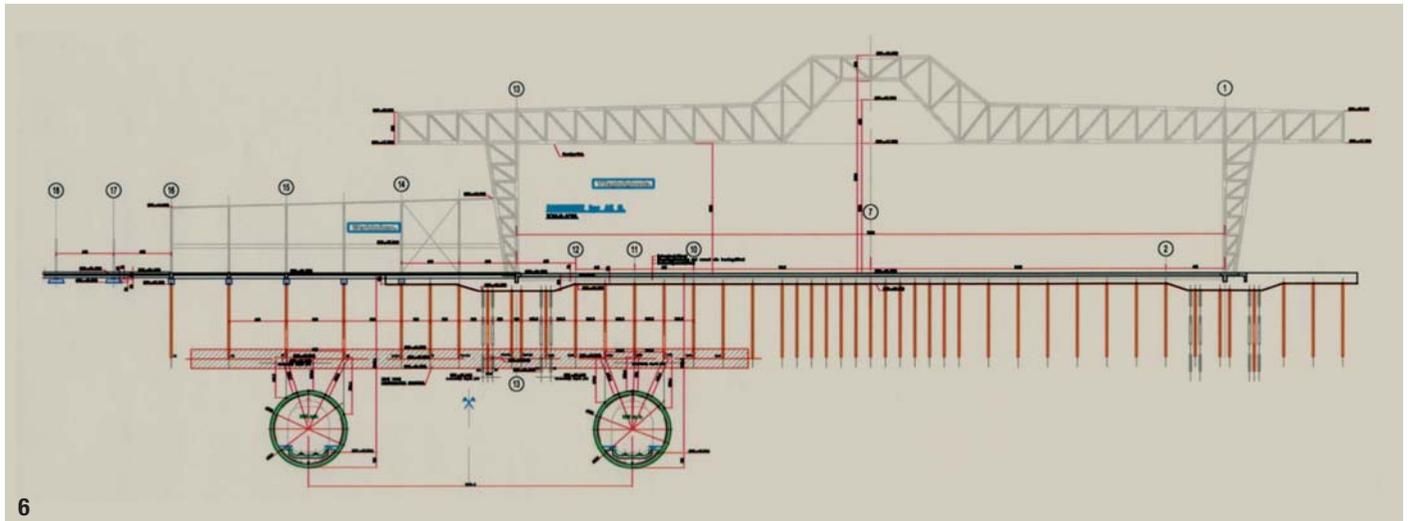
Le projet de référence prévoyait le démarrage du forage depuis la zone de Brucargo en direction de l'aérogare et l'implantation du puits d'arrivée tel qu'indiqué à la figure 3. Ensuite, le tunnelier devait être reçu sur un berceau et tourné, afin de faire le second forage vers le puits de départ initial. En effet, les conditions de sécurité en vigueur dans l'aérogare, interdisent l'utilisation d'engins à grande hauteur, tels que des grues. Les efforts nécessaires pour tourner le tunnelier, pouvaient être résistés par les parois en béton du puits d'arrivée.

La solution présentait l'inconvénient de devoir transporter les terres excavées et amener le mortier d'injection et les voissors, par le premier tunnel. Ce long trajet présentant trop de difficultés pour l'entreprise, l'alternative avec adaptation des limitations en hauteur des engins fut acceptée par le gestionnaire de l'aérogare. Ainsi l'extraction du tunnelier du puits d'arrivée devenant réalisable, deux trajets identiques du forage sont effectués. Après le premier forage la tolérance par rapport à l'axe du tube n'atteignait que 0,02 m, la longueur de ce tube étant de 1080 m. La photo 4 montre la descente de la tête coupante du tunnelier lors du premier assemblage de la machine. Cette vue montre la hauteur des engins de levage nécessaires pour l'opération. La photo 5 montre l'arrivée du tunnelier à la fin du premier trajet. Les barres d'armatures, prêtes à être coupées, sont du type polymère renforcés de fibres de verre. Quelques données typiques du premier forage concernent la pression exercée au front, variant de 1,15 à 1,5 bar, la pression d'injection à la queue variant entre 3 et 4 bar. La masse injectée à la queue est de l'ordre de 6,8 m³, la vitesse d'avancement du tunnelier étant bien sûr variable, mais atteignant des valeurs maximales jusqu'à 13,5 m/jour.

HANGAR 117

Un point particulier sur le trajet du forage est le passage sous le hangar 117. Comme montré à la figure 6, ce hangar est essentiellement une charpente métallique avec structure





- 2- Passage de la connexion Diabolo sous l'aérogare.
- 3- Simulation des tunnels forés sous le site.
- 4- Montage de la tête du tunnelier au puits de départ.
- 5- Arrivée du tunnelier après le premier forage.
- 6- Passage des tunneliers sous le hangar 117.
- 7- Points de repère pour scanning au laser.
- 8- Boîtes d'enregistrement des gauges de contrainte.
- 9- Coupe de la partie en tranchée couverte.

- 2- Passage of the Diabolo connection under the air terminal.
- 3- Simulation of tunnels bored under the site.
- 4- Assembly of the TBM head in the starting shaft.
- 5- Arrival of the TBM after initial drilling.
- 6- Passage of TBMs under shed 117.
- 7- Reference points for laser scanning.
- 8- Strain gauge recording boxes.
- 9- Cross section of the cut-and-cover part.

portante en treillis, fondée sur pieux en béton préfabriqués. Le type de fondation est étonnant, puisque le hangar voisin, assez semblable possède une fondation directe sur semelles. Ce type de bâtiment supporte facilement des tassements modérés. Cependant, le hangar est équipé de grandes portes coulissantes. L'utilisation de ces portes pourrait être dérangée par des tassements différentiels ou une pente inacceptable de leur système de roulement. En outre, la base des pieux, se situant à plusieurs endroits à une distance verticale de 2 m au-dessus du tunnelier en passage, une instabilité soudaine pourrait se produire lors du creusement au front et la décompression afférente. Pour des raisons de sécurité, le projet de référence prévoyait une injection de compensation de la fondation du hangar 117. Ces dispositions sont montrées à la figure 6. A la suite du dialogue technique, l'injection de compensation fut remplacée par une amélioration

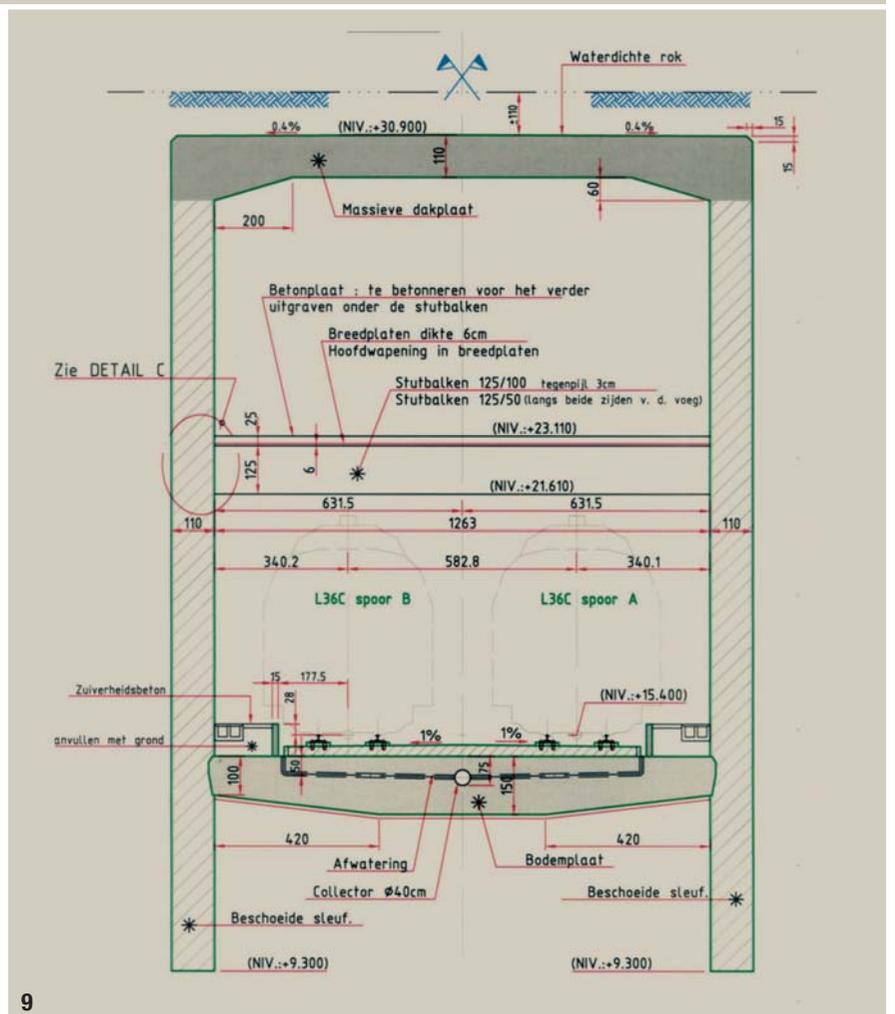
du terrain par jet grouting, constituant une couche renforcée passive au lieu d'active. Lors du passage du tunnelier, aucun incident ne s'étant produit, la variante a prouvé son efficacité.

INSTRUMENTATION DU TUNNEL

Pendant le forage des tunnels, ceux-ci ont été instrumentés par des dispositifs divers. Près du puits de départ, une section perpendiculaire à l'axe des deux

tunnels fut équipée d'extensomètres, inclinomètres et sondes pour mesurer la pression des terres. Des levés du terrain ont été effectués par un système automatique au laser. En outre, l'ovalisation des anneaux a été mesurée, immédiatement après la construction d'un anneau et ensuite pendant une période suffisamment longue à la stabilisation entière de cet anneau. Ces mesures sont effectuées dans 6 sections de chaque

tube, au moyen d'un scanning par laser. Un repère est montré dans la figure 7. En complément, les mêmes anneaux ont été munis de gauges résistives, afin de mesurer les contraintes dans les voussoirs. Ces dernières mesures sont enregistrées en continu, par le système montré à la figure 8. Les données sont envoyées par transmission directe sur une bande de fréquence de GSM, aux unités montrées à la photo, et ensuite

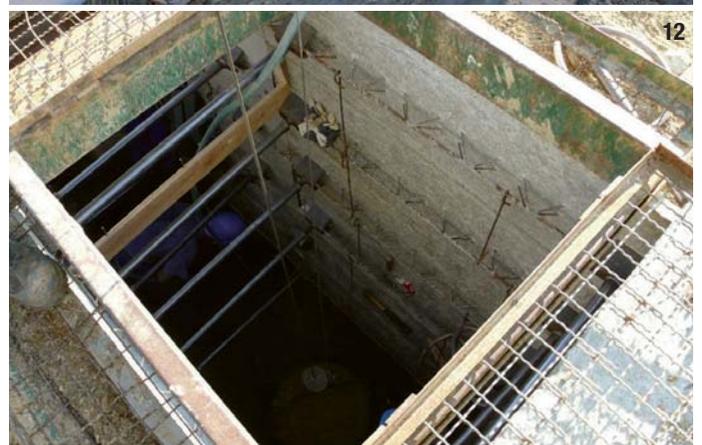


recueillies par période de 3 semaines. Au mois de juin 2009, le résultat de ces mesures est encore à évaluer.

TRONÇONS EN TRANCHÉE COUVERTE

Les tronçons adjacents aux tunnels forés sont réalisés par tranchées couvertes. Au Nord, la connexion vers la berme centrale de l'autoroute, comprend une première section à double voie, située principalement sous les routes de desserte de l'aéroport Brucargo. Ce tronçon a une longueur de 490 m et est entièrement construit au moyen de parois moulées. La séquence de construction consiste à réaliser ces parois, ayant une profondeur variable jusqu'à 22 m, et ensuite de les compléter par la dalle de toiture, coulée sur terre-plein. Après finition de la dalle, les routes et accès aux entreprises peuvent être rétablis. L'excavation des terres au-dessous de la dalle, est réalisée sous protection de cette dernière, mais ne gêne en rien l'exploitation des installations en surface. Afin d'excaver les terres, réutilisables sur les parties du projet « Diabolo » situées dans la berme centrale de l'autoroute, la nappe phréatique doit être rabattue. Cependant, le permis d'urbanisme impose la limitation de l'effet du rabattement en dehors des parois moulées à 1 m par rapport au niveau initial. Par conséquent, lors de l'excavation, la pression latérale sur les parois comprend la poussée des terres, mais également une pression d'eau non négligeable de l'ordre de 13 m. La limitation de l'influence du rabattement est imposée afin de ne pas perturber la végétation dans le bois voisin du Floodam. Une coupe transversale du tronçon est montrée à la figure 9 ; les difficultés de construction de parois moulées, près de l'aéroport étant montrées à la figure 10. Les voies ferrées enterrées se trouvant à une profondeur allant jusqu'à 16 m, et au vu de la pression latérale, les parois moulées subissent d'importants moments de flexion. Afin de limiter ces moments, des supports intermédiaires, soit par poutres isolées, soit par dalles intermédiaires, sont construits. De cette manière sont créés des locaux techniques, où il est possible d'installer les équipements de sécurité du tunnel et de signalisation. La coupe de la figure 9 montre également la pose directe des voies fixées sur une dalle en béton. Il est évident que, malgré les précautions prises, la méthode de construction engendre des nuisances au niveau des utilisateurs de l'aéroport Brucargo. Afin de

garantir la continuité de l'accès et de la circulation, un phasage de construction détaillé est observé. En outre, le procédé des parois moulées nécessairement produit des nuisances en matière de propreté du chantier, particulièrement par l'utilisation de la boue à la bentonite. A certains endroits, l'entreprise a dû utiliser des écrans de protection verticaux jusqu'à une hauteur de 4 m. Avant d'atteindre l'autoroute, la liaison est scindée en deux branches, dont une vers le Nord et la seconde vers le Sud. La première passe au-dessous d'une sortie de l'autoroute, qui est temporairement déviée pendant la construction. La réalisation du tunnel doit donc être effectuée dans une fouille ouverte. Près des voiries, un blindage berlinois est utilisé, montré à la photo 11. Dans cette zone, une multitude de câbles et conduites a dû être déplacée. Un ouvrage particulier concerne le passage sous la « Luchthavenlaan », sur la branche Sud de la connexion. L'endroit du passage est proche d'un pont existant au-dessus de l'autoroute et ne permet que des déviations très locales de la route, limitées dans le temps. L'utilisation de parois moulées devenant impossible à cet endroit, les murs latéraux sont construits par la méthode des 'fouilles blindées'. Ce procédé, entièrement manuel, de l'excavation des murs, nécessite le rabattement complet de la nappe phréatique, afin que le travail puisse être effectué à sec. Ce rabattement ne pose aucun problème dans la partie du projet concernée. Le procédé des fouilles blindées, consiste en l'excavation manuelle, sous la protection de plaquettes en béton armé, tenues à distance par des étançons métalliques. Une fouille blindée avant pose des armatures et bétonnage est montrée à la figure 12. Après passage sous les bandes de circulation en direction du Nord, les voies ferrées seront placées dans la berme centrale de l'autoroute E 19. Cette autoroute fut construite fin des années 60 du siècle dernier, et est munie d'une large berme centrale non occupée. Initialement, cette berme était prévue pour y installer des bandes de circulation rapides, sans sortie entre Bruxelles et Malines. L'espace sera occupée par la nouvelle connexion du « Diabolo ». Les voies remontent en surface comme montré à la figure 13. Entre la plate-forme ferroviaire et l'autoroute, un écran de sécurité, d'une hauteur minimale de 3 m, est partiellement remblayé et équipé de plantations adaptées.



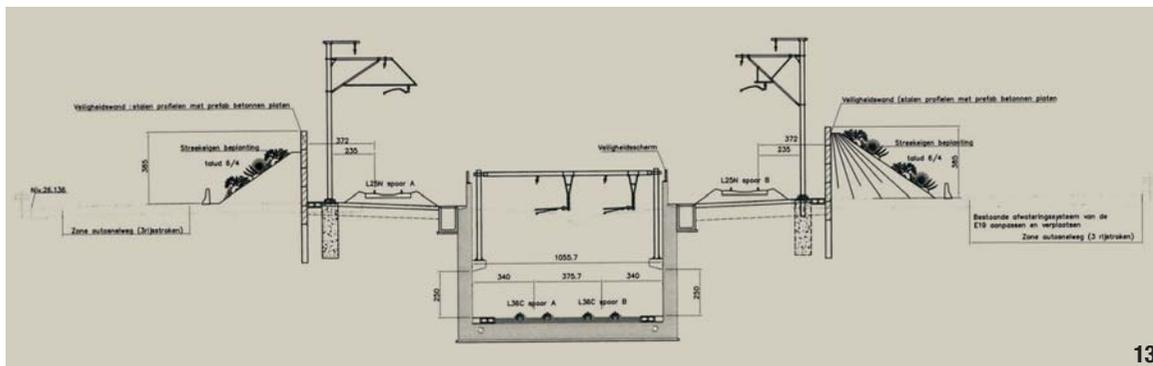
10- Parois moulées construites dans l'aire de l'aérogare.

11- Construction à l'abri de paroi berlinoise.

12- Fouille blindée.

13- Coupe transversale de l'autoroute avec voies dans la berme centrale.

14- Forme de la toiture de la tranchée couverte dans le prolongement de la gare.



10- Diaphragm walls built in the terminal area.

11- Construction protected by a Berlin-type retaining wall.

12- Lined excavation.

13- Cross section of the motorway with lanes in the central berm.

14- Shape of the cut-and-cover tunnel roof extending the station.

EXTENSION DE LA GARE SOUTERRAINE EXISTANTE

L'extension de la gare souterraine est également construite en tranchée couverte. Cependant, la limitation en hauteur des grues et engins a nécessité l'utilisation d'une méthode plus originale. Celle-ci consiste à faire un déblai préliminaire du terrain d'une hauteur de

5 m, la nappe phréatique se trouvant à cet endroit à 6 m au-dessous du terrain naturel. Les grues sont ensuite amenées dans ce puits de construction et la tranchée couverte est construite sans autre encombrement. La toiture de la tranchée a une forme originale en poutre Vierendeel, telle que l'on voit à la photo 14. Ce type de structure présente une résistance nettement supérieure à celle d'une simple dalle pleine, ce qui n'empêche pas qu'elle est plus onéreuse. La dalle de fond possède une forme semblable. La section consiste en un rectangle central avec une hauteur résistante de 3 m. Ce rectangle est complété par deux triangles latéraux. La construction se fait en plusieurs étapes successives, comme le montre la photo 14. La dalle de fond comprend 4 parois verticales au lieu de 2. Ainsi des compartiments plus petits sont constitués.

Les compartiments latéraux sont remplis de sable, le pertuis central faisant fonction de drain central visitable. Un tel drain a été prévu dans la jonction Nord-Sud d'Anvers et existe depuis plus de 60 ans dans la jonction Nord-Sud de Bruxelles et rend de grands services en cas de pluie abondante.

CONCLUSIONS

Le 26 juin 2009 le premier forage par tunnelier sous la partie protégée de l'aérogare Bruxelles National fut achevé. Le second tunnel sera également terminé cette année. La préparation de travaux dans un site hautement protégé, où l'entrée du personnel et des matériaux est contrôlée à chaque passage et où la manutention par engins est strictement limitée, pose un large défi pour l'entreprise. En outre, la formule du PPP (Partenariat Public Privé) avec

financement indépendant, multiplie le nombre d'intervenants et rend les décisions très difficiles, tant bien pour le constructeur que pour le bureau d'études. Néanmoins, le travail continue, nécessitant des efforts considérables en main d'oeuvre et moyens. En effet, les échéances contractuelles ne permettent aucun retard, puisque l'installation des équipements ferroviaires doit immédiatement suivre le chantier de construction. Il est certain que la réalisation du projet « Diabolo » rendra le train le moyen de transport le plus facile pour atteindre Bruxelles National aéroport, qui sera connecté au réseau Européen des lignes à grande vitesse. □

1- L'original de cet article a été publié dans la revue Tunnels et Ouvrages souterrains - N°214 - Juillet/Août 2009.

ABSTRACT

THE 'DIABOLO' TUNNEL UNDER THE BRUSSELS AIR TERMINAL

PHILIPPE VAN BOGAERT ET BART DE PAUW, TUC RAIL BRUXELLES - JOHAN MIGNON, WAYSS UND FREYTAG BENELUX

The Diabolo project consists of a new railway line linking Brussels to Malines, passing via Brussels international airport at Zaventem.

The plan for extension of the existing railway lines under the airport's three main runways involves the execution of a double-tube tunnel 7.30m in diameter excavated by tunnel boring machine, and several cut-and-cover tunnels, in a very favourable geological context (sands and passages of soft sandstones). The contract, in PPP form, allowed certain project changes and improvements to be made by comparison with the standard solutions.

Two points in particular required a specific technical solution:

- Due to the passage of the new tracks under a maintenance shed sensitive to settlement, soil treatment was performed by jet grouting (instead of the compensation grouting originally planned);
- Under an existing bridge, the diaphragm walls had to be replaced by conventional walls with formwork, after groundwater lowering.

To conclude, the authors specify that work on the project is on schedule despite a few problems related to contractual difficulties and restrictive working conditions; the first tube of the tunnel was drilled on 26 June 2009 and the second tube is due to be completed before the end of 2009. □

EL TÚNEL «DIABOLO» BAJO LA TERMINAL DE AEROPUERTO DE BRUSELAS

PHILIPPE VAN BOGAERT ET BART DE PAUW, TUC RAIL BRUXELLES - JOHAN MIGNON, WAYSS UND FREYTAG BENELUX

El proyecto Diabolo consiste en una nueva línea de ferrocarril que une Bruselas con Malines pasando por el aeropuerto internacional de Bruselas en Zaventem.

El proyecto de ampliación de las vías férreas existentes bajo las tres pistas principales del aeropuerto incluye la ejecución de un túnel bitubo de 7,30 metros de diámetro excavado mediante una tuneladora y de varios falsos túneles, en un contexto geológico bastante favorable (arenas y partes de arenisca blanda). El contrato en forma de APP ha permitido ciertas modificaciones y mejoras del proyecto respecto a las soluciones de base.

Dos puntos particulares han exigido una solución técnica específica:

- la instalación de nuevas vías bajo un hangar de mantenimiento sensible al asentamiento ha llevado a realizar un tratamiento del suelo mediante jet grouting (en lugar de las inyecciones de compensación inicialmente previstas);
- bajo un puente existente, las pantallas continuas tuvieron que ser sustituidas por muros tradicionales con encofrados, tras la evacuación de las aguas de la capa freática.

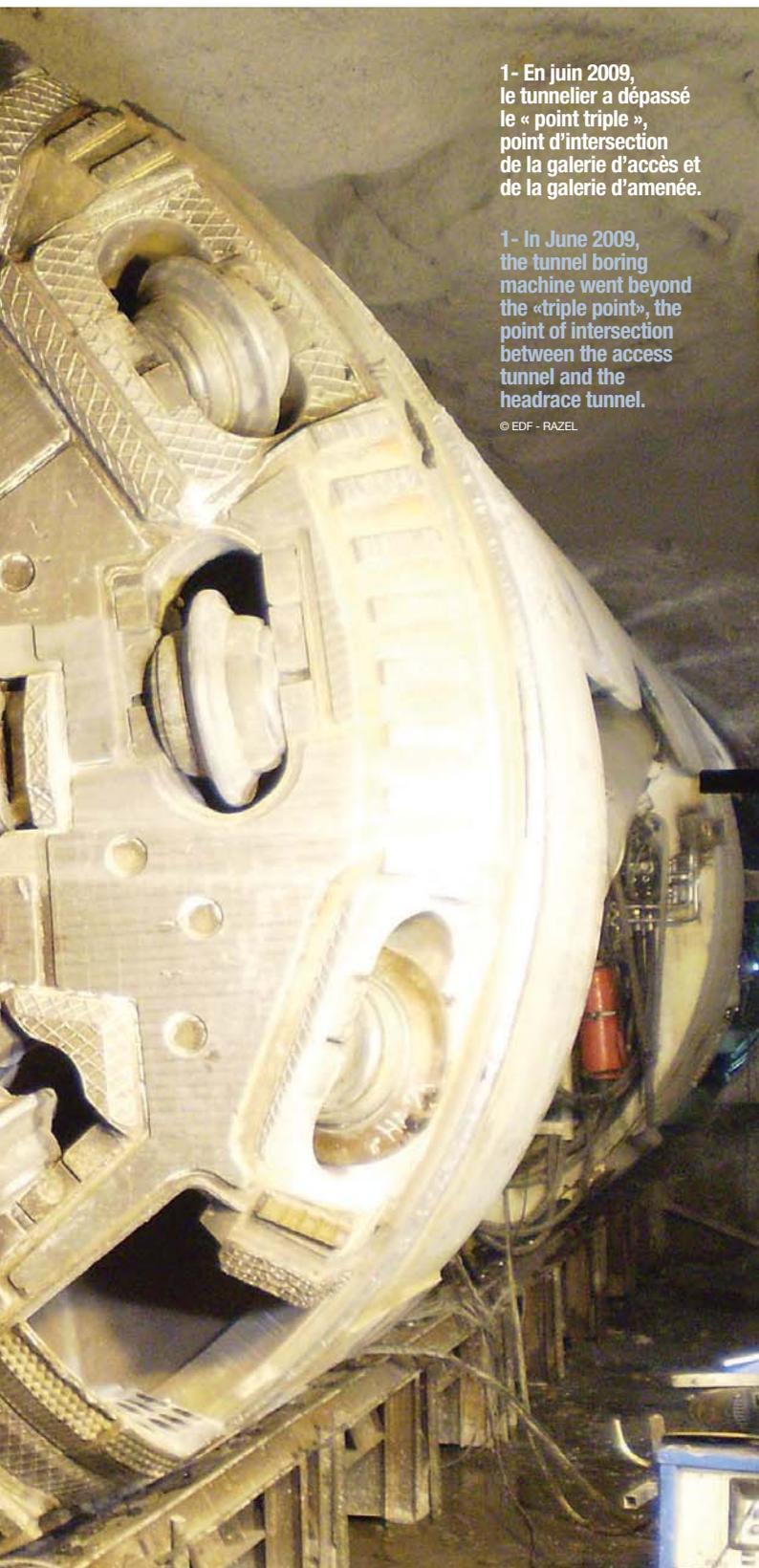
En conclusión, los protagonistas precisan que el proyecto se desarrolla de conformidad con la planificación pese a unos problemas vinculados con diversas dificultades contractuales y condiciones laborales sumamente difíciles; la excavación del primer tubo del túnel se ha ejecutado el 26 de junio de 2009 y el segundo tubo debería finalizarse antes de que acabe el año 2009. □

AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE SUR LE BARRAGE DE RIZZANESE

AUTEURS : PIERRE POILBOUT, CHEF D'AMÉNAGEMENT, DIRECTION PRODUCTION INGÉNIERIE, CENTRE D'INGÉNIERIE HYDRAULIQUE EDF -
SYLVAIN MANDÉGOUT, DIRECTEUR DE CHANTIER, DÉPARTEMENT RAZEL TRAVAUX SOUTERRAINS -
PIERRE DUREL, CHEF DE SECTEUR MATÉRIEL, DÉPARTEMENT RAZEL TRAVAUX SOUTERRAINS



RÉPONDRE AUX BESOINS ÉNERGÉTIQUES CROISSANTS DE L'ÎLE A CONDUIT L'ASSEMBLÉE DE CORSE À LA MISE EN ŒUVRE DE L'AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DU RIZZANESE, FLEUVE DE CORSE DU SUD. LE BARRAGE A DÉMARRÉ EN JUILLET 2008. IL SE COMBINE EN TROIS GRANDS PÔLES D'ACTIVITÉ. AU-DELÀ DE LA TECHNICITÉ DE L'OUVRAGE, LE PROJET S'EST CONSTRUIT AUTOUR DE LA PRÉSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT.



1- En juin 2009, le tunnelier a dépassé le « point triple », point d'intersection de la galerie d'accès et de la galerie d'aménée.

1- In June 2009, the tunnel boring machine went beyond the « triple point », the point of intersection between the access tunnel and the headrace tunnel.

© EDF - RAZEL

L'énergie électrique produite en Corse provient pour l'essentiel des centrales thermiques, des interconnexions au réseau électrique italien et des centrales hydroélectriques. Aujourd'hui environ 25 % de l'électricité est produite grâce aux 3 barrages et 7 centrales hydroélectriques exploitées par EDF sur le Prunelli, le Golo et le Fium'orbo (12 micro-centrales d'une puissance installée de 20 MW sont exploitées par des producteurs indépendants).

Afin de répondre à la consommation d'électricité en Corse, qui augmente d'environ 3 % par an, EDF a engagé la construction d'un nouveau barrage sur le Rizzanese, au sud de l'île (figure 2). Cet ouvrage mesurera 40,5 mètres de haut et permettra de faire fonctionner en période de forte consommation (entre 9h et 13h et de 17h à 22h), une centrale électrique d'une puissance installée de 55 MW qui produira annuellement près de 80 GWh. En période de pointe, cette puissance représentera l'équivalent de la consommation des 4 micro-régions de l'Alta Rocca, du Sartenais, du Valinco et du Taravo, soit l'équivalent des besoins d'une agglomération de 60 000 habitants telles que Bastia ou Ajaccio.

Le barrage du Rizzanese sera, en 2012, après ceux de Tolla, de Calacuccia et de Sampolo, le quatrième aménagement hydroélectrique exploité par EDF en Corse.

Avec cet équipement, la puissance installée du parc hydraulique corse augmentera de 40 %. Il permettra de réduire la consommation de fioul de près de 20 000 tonnes par an.

Au-delà de sa dimension énergétique, le barrage du Rizzanese aura un rôle important pour la région de l'Alta Rocca, puisqu'il permettra de fournir chaque année à l'Office d'équipement hydraulique de la Corse 1,6 million de m³ d'eau brute. La retenue d'eau sera gérée suivant des modalités différentes en fonction des saisons. L'hiver et en

de demi-saison, elle servira à la production d'électricité pour satisfaire la demande qui est plus élevée à cette période de l'année. L'été, l'énergie produite par la centrale sera limitée et l'eau stockée dans la retenue sera prioritairement réservée aux besoins de l'Office hydraulique.

TROIS GRANDS PÔLES D'ACTIVITÉ

Premier pôle, le barrage, réalisé par GTM et Bec Frères. Situé en amont du tronçon le plus pentu et le plus énergétique du fleuve, d'une hauteur de 41 mètres pour une longueur de crête de 140 mètres, le barrage est construit en béton compacté au rouleau (BCR). L'ouvrage sera le quatrième ouvrage hydraulique de l'île. En termes de planning, la mise en eau de la dérivation provisoire se déroulera à la fin de cette année. Les fouilles du barrage et les injections sont prévues en 2010. Le montage du barrage au BCR, en 2011, pour une livraison en 2012 (figure 3). Quant à la retenue d'eau située sur les communes de Levie et Sorbollano, elle occupera une superficie de 11 ha environ et aura une capacité totale de 1 300 000 m³, pour une capacité utile de 1 000 000 m³ (figure 4).

Le deuxième pôle concerne les travaux souterrains menés par Razel (mandataire) et Bec Frères, filiales du Groupe Fayat. La galerie d'aménée d'eau, de 5,8 km dont 440 m avec blindage, est creusée sur 5,5 km avec un tunnelier de 3,5 m de diamètre (photo 5). La cheminée d'équilibre, d'une hauteur de 90 mètres et d'un diamètre de 7 mètres, permettra de limiter le « coup de Béliér » qui a pour effet d'engendrer une surpression dans la galerie et la conduite forcée lors des manœuvres de la vanne de pied située dans la centrale (photo 6). À ce jour, les dates clés ont été tenues.

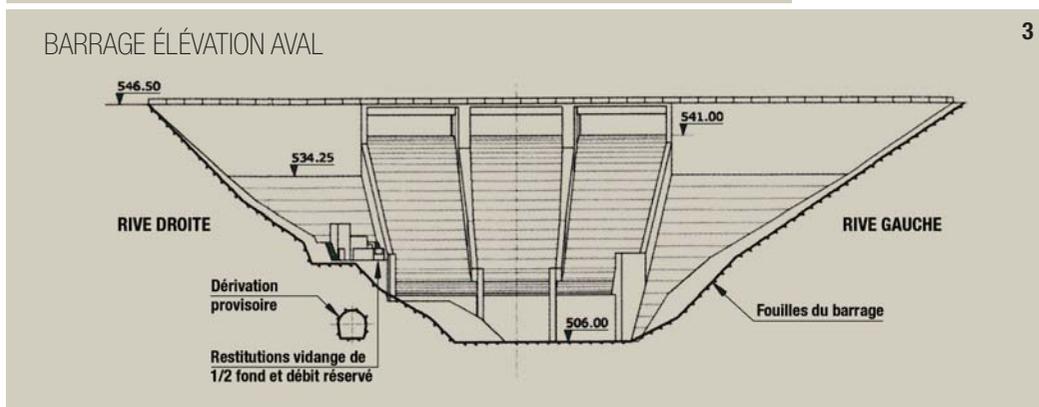
Le troisième pôle concerne les ouvrages à l'aval, construits par des entreprises locales (pour le Génie Civil Corse ▷



2- Site d'implantation du barrage de Rizzanese.
3- Barrage, élévation aval.

2- Location of Rizzanese dam.
3- Dam, downstream elevation view.

Européenne d'Entreprise, Ciabrini, Vendasi et Corse Travaux). Il est constitué de la conduite forcée et de la centrale (figure 7). La conduite d'amènée d'eau, d'un diamètre de 1,75 mètres et d'une longueur 1 245 mètres, amènera l'eau jusqu'à la centrale de Sainte-Lucie-de-Tallano. Elle sera enterrée sur une distance d'environ 560 mètres au voisinage de la chapelle Saint Jean-Baptiste. La Centrale hydroélectrique de Sainte-Lucie-de-Tallano, située en bordure du Rizzanese, sera équipée de deux turbines de type « Pelton » d'une puissance nominale de 27,5 MW (figure 8). Le bassin de démodulation, situé à proximité immédiate de la centrale, aura une capacité de 15 000 m³. Il permettra de restituer de façon progressive dans le lit du Rizzanese les débits turbinés. Enfin, le poste de transformation sera constitué de deux transformateurs 5,65 kV/90 kV de 34 MVA chacun.



AVANCEMENT DES TRAVAUX

Après une année de travaux préparatoires consacrée aux routes d'accès aux différents ouvrages (tous réalisés par des entreprises locales), les équipes de Razel Travaux souterrains sont arrivées sur site en juillet 2008.



Avec un mois d'avance sur l'ordonancement, le transport du tunnelier, en décembre 2008, n'a pas été simple, la trame urbanistique serrée du village de Sainte-Lucie-de-Tallano n'étant guère propice à l'acheminement d'un matériel de cette envergure. Le plus gros colis (le corps avant du tunnelier) d'une masse de 45 tonnes, a nécessité l'utilisation d'une remorque avec roues directionnelles pour le passage d'un pont particulièrement étroit.

Le tunnelier (voir encadré), baptisé Colomba en janvier 2009, en mémoire de la célèbre héroïne corse de Prosper Mérimée, est arrivé toutefois sans encombre. Aujourd'hui, ont été réalisés 1 900 ml de creusement dans une roche très dure et très abrasive.

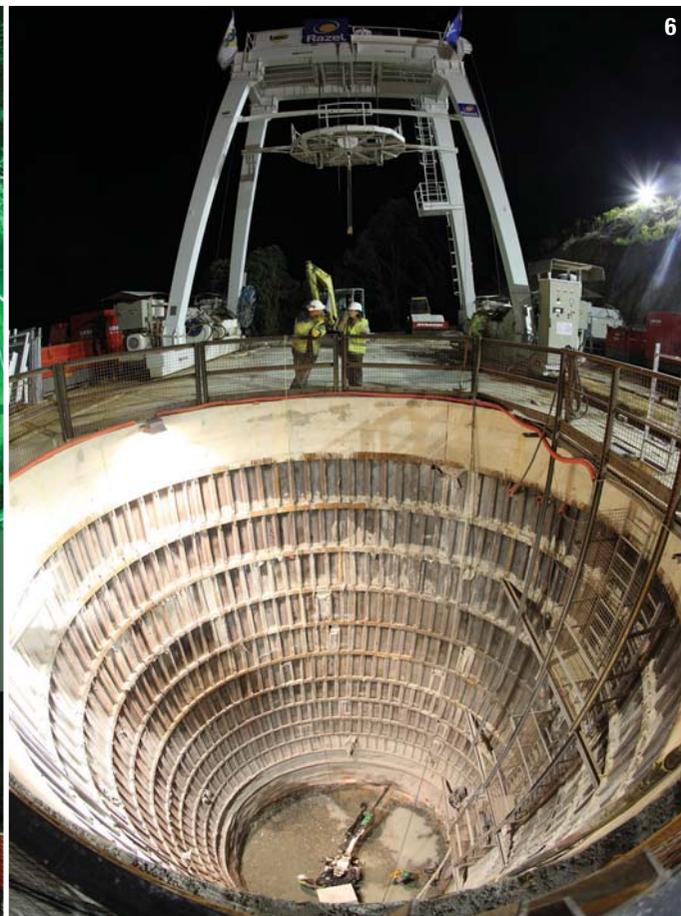
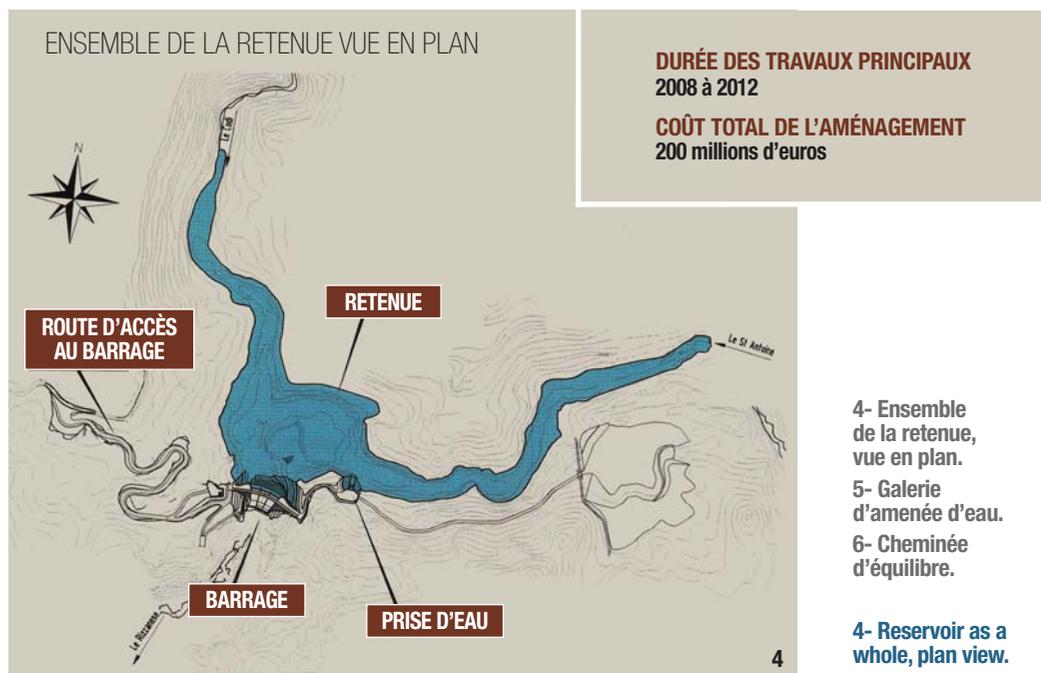
Le terrain rencontré est constitué essentiellement de diorites entremêlées de quelques passées micro-granitiques ou granitiques. À ce jour, le terrain s'est révélé stable, ne nécessitant que très peu de soutènement au passage du tunnelier. Cependant, le cortège dioritique semble plus étendu qu'initialement prévu et sensiblement plus dur, ce qui pénalise pour le moment l'avancement du tunnelier qui peine à franchir cette zone (photos 9 et 10).

Conformément au calendrier des travaux, le tunnelier a dépassé le « point triple », point d'intersection de la galerie d'accès et de la galerie d'aménée en juin 2009. Fin août 2009, près de 1 900 ml de creusement ont été réalisés sur un total de 5 800 ml. La traversée

du point triple s'est déroulée du 11 au 16 mai dernier. Une opération délicate qui a consisté à riper la machine sur 30 m. L'occasion aussi de faire une visite de tête du tunnelier, de changer les molettes et de faire de la maintenance plus lourde.

Quant à la cheminée d'équilibre à fin août 2009, 45 m sont creusés sur un total de 90.

Les parties non creusées au tunnelier ont été excavées en traditionnel à l'explosif avec une section en fer à cheval. Au total 280 ml de galerie ont été



« **LA
PRÉSERVATION
DE LA
BIODIVERSITÉ
AUTOUR
DU FUTUR
RÉSERVOIR
EST UN ENJEU
PRIORITAIRE
POUR EDF** »

creusés à l'explosif en section 10 m². De plus, 282 ml de galerie creusés en 1991 dans le cadre de travaux préparatoires ont été confortés.

Concernant la cheminée d'équilibre, d'une hauteur totale de 90 m, elle a été creusée sur les 20 premiers mètres en diamètre 7,00 m en « traditionnel » pour traverser les terrains altérés.

Une fois la roche saine rencontrée, le reste de la cheminée a été réalisé grâce à la technique du « raise boring » en diamètre 2,40 m puis 1,80 m complétée par un réalésage à l'explosif au diamètre 7,00 m sur une partie de la hauteur.

PRÉSERVER L'ENVIRONNEMENT

Les grands aménagements s'accompagnent de débats autour de l'environnement. Sensibilisée en effet, la population n'est plus prête à accepter des infrastructures qui viendraient défigurer leur mode et leur qualité de vie.

EDF développe en amont une politique de protection et de mise en valeur du patrimoine environnemental.

La conception des ouvrages s'accompagne toujours d'études d'impact. Lors de la réalisation ensuite, une veille constante est menée.

La préservation de la biodiversité autour du futur réservoir d'1,3 million de m³

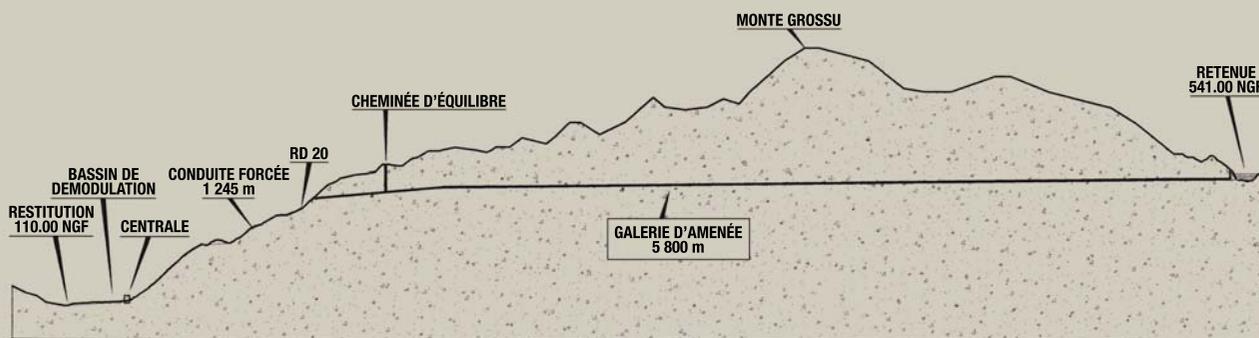
7- Profil en long général.

8- Centrale, coupe longitudinale.

7- General longitudinal profile.
8- Power station, longitudinal section.

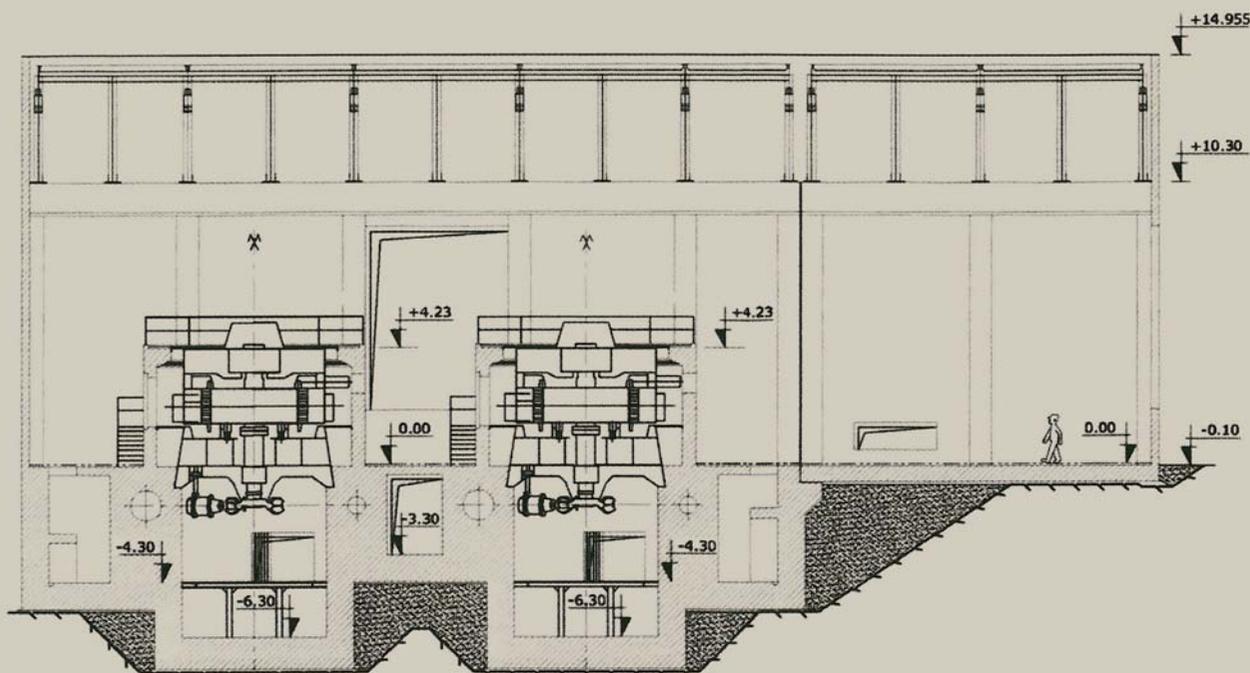
7

PROFIL EN LONG GÉNÉRAL



8

CENTRALE, COUPE LONGITUDINALE



9- Creusement dans une roche dure de granite et diorite.

10- Poste de conduite dans le tunnelier avec son système de guidage embarqué.

9- Digging in hard granite and diorite rock.

10- Control station in the TBM with its on-board guidance system.

est un enjeu auquel EDF s'attache particulièrement. L'entreprise prévoit ainsi de lâcher un débit d'eau permanent qui permettra à la faune et la flore de continuer à se développer. Autre exemple : les plantations d'oliviers, parfois centenaires, ont été préservées, notamment par des opérations de transplantations sur des terrains voisins du chantier.

Par ailleurs, EDF, en concertation avec l'ensemble des services de l'État en charge de la valorisation du patrimoine, a proposé d'aménager les abords de la Chapelle St-Jean-Baptiste de Poggio di Tallà et de mettre en valeur ce site.

L'ouvrage nécessitera un volume de

500 000 heures de travail pour les entreprises régionales. Le groupe s'est également efforcé de favoriser l'emploi local. Un quart des heures réalisées chez Razel le sont par du personnel local. Enfin, le projet a permis au secteur tertiaire de bénéficier des retombées, notamment en termes de restauration et d'hébergement.

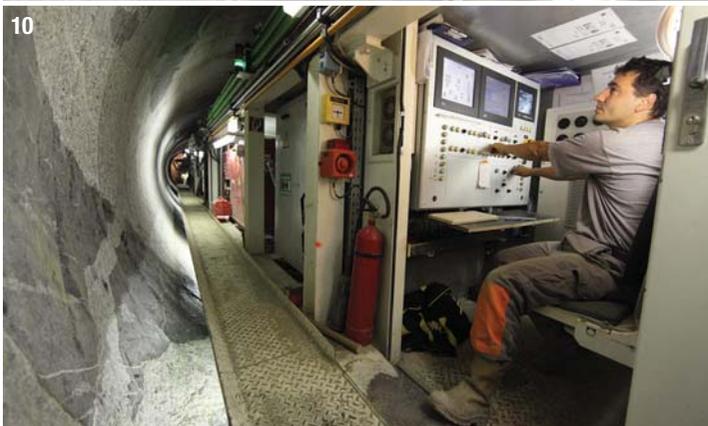
Aujourd'hui, l'acceptation et l'appropriation de ce type de grand projet par la population est une condition de réussite. Celle-ci passe par une intégration de l'homme et de son environnement depuis la conception de l'ouvrage jusqu'à sa réalisation. □

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE
EDF SYSTEMES ENERGETIQUES
INSULAIRES CENTRE DE CORSE

MAÎTRE D'ŒUVRE
EDF CENTRE D'INGENIERIE
HYDRAULIQUE

ENTREPRISES PRINCIPALES
Razel (mandataire pour les
travaux souterrains), Bec
Frères, Vinci, Corse Européenne
d'Entreprise, Ciabrini, Vendasi,
Corse Travaux



LE TUNNELIER COLOMBA

Le tunnelier a été spécialement étudié et construit pour le projet du tunnel du Rizzanèse. Il s'agit d'un tunnelier de marque Herrenknecht de type roche dure à grippers sans pose de voussoirs.

Ses caractéristiques principales sont :

DIAMÈTRE DE FORATION : 3 500 mm
ROUE DE COUPE : 22 molettes de 17 pouces.
PUISSANCE DE LA MOTORISATION DE LA ROUE DE COUPE : 800 kW
FORCE DE POUSSÉE : 17 000 kN
COURSE DES VÉRINS : 1 500 mm
FORCE DE GRIPPAGE : 35 000 kN
MASSE DU BOULIER COMPLET : 120 tonnes
SOUTÈNEMENT : Erecteur permettant la pose de cintres
BOULONNAGE : 2 unités
LONGUEUR DU TRAIN SUIVEUR : 100 mètres
TEMPS DE MONTAGE : 6 semaines

Le marin est transféré à l'arrière du train suiveur par un transporteur à bande qui se déverse dans un train constitué de 5 berlines capables d'évacuer les déblais correspondants à 2,60 mètres d'avancement. Les trains au nombre de trois sont tractés par les locotracteurs à batteries. Sur la plateforme extérieure, les berlines sont basculées latéralement pour être vidées. Le marin est ensuite repris par un chargeur sur pneu et évacué par tombereau vers la décharge située à 2 kilomètres. Au-delà de 2 000 mètres, un « californien » mobile (zone à double voie permettant le croisement de deux trains) sera installé en tunnel.

ABSTRACT

HYDROELECTRIC POWER SCHEME AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT ON RIZZANESE DAM (CORSIKA)

PIERRE POILBOUT, EDF - SYLVAIN MANDÉGOUT, RAZEL - PIERRE DUREL, RAZEL

To meet the island's growing energy needs, the Corsican parliament approved the execution of a hydroelectric power scheme on the Rizzanese, a river in southern Corsica. Work on the dam began in July 2008. It involves three major sectors of activity. Apart from the highly technical nature of the works, the project was built around environmental conservation. □

ORDENACIÓN HIDROELÉCTRICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE EN EL EMBALSE DE LE RIZZANESE (CÓRCEGA)

PIERRE POILBOUT, EDF - SYLVAIN MANDÉGOUT, RAZEL - PIERRE DUREL, RAZEL

Responder a las crecientes necesidades energéticas de la isla ha llevado a la Asamblea de Córcega en implementar la ordenación hidroeléctrica del río Rizzanese, ubicado en el sur de Córcega. El embalse empezó su funcionamiento en julio de 2008, y se combina en tres grandes polos de actividad. Más allá de la tecnicidad de la obra, el proyecto se ha construido en torno a la preservación del medio ambiente. □



TUNNEL DU MONT-CENIS - FRÉJUS : UNE MODERNISATION FERROVIAIRE STRATÉGIQUE

AUTEUR : RACHID KEBBAJ, CHEF DE SERVICE TRAVAUX, BOUYGUES TP

LES TRAVAUX DE MODERNISATION DU TUNNEL FERROVIAIRE DU MONT-CENIS – FRÉJUS S’INSCRIVENT DANS LE CADRE DE LA MODERNISATION ET DE LA MISE AU GRAND GABARIT FRET DE 19 TUNNELS SUR UN ITINÉRAIRE ALLANT DE DIJON À TURIN VIA MODANE. CET AXE STRATÉGIQUE PARTICIPE AU DÉVELOPPEMENT DU TRANSIT MARCHANDISE ENTRE L’EUROPE DU NORD, LA FRANCE ET L’ITALIE ET PERMET DE RELIER L’ESPAGNE À LA HONGRIE EN PASSANT PAR LA FRANCE ET LA SLOVÉNIE.

UN PEU D’HISTOIRE

Le tunnel ferroviaire du Mont-Cenis Fréjus est le premier tunnel ferroviaire transalpin. Long de 14 km, il relie Modane en France à Bardonecchia en Italie. Inauguré le 19 septembre 1871, il a été jusqu’en 1882 le plus long tunnel du monde et surtout le premier tunnel jamais creusé grâce à l’utilisation de l’air comprimé pour le forage (photos 2 et 3).

UNE CONTRAINTE DE TAILLE

Les travaux sont réalisés sous circulation ferroviaire. Plus de soixante dix trains voyageurs et fret circulent tous les jours dans le tunnel entre 18h00 et 12h30 le lendemain. La circulation commerciale dans le tunnel n’est interrompue que durant une période d’environ 4h30 dite « période simultanée » (figure 4).

UN ENVIRONNEMENT EXTRAORDINAIRE DIFFICILE

La particularité de ce chantier est qu’il combine deux environnements à risque, à savoir des travaux sous circulation ferroviaire dans un tunnel de très grande longueur « coupé en son milieu à la frontière Franco-italienne » avec une seule entrée côté France. Les principaux risques liés aux travaux sont de deux ordres.

Les risques exportés par les travaux vers l’environnement ferroviaire et les risques importés par l’environnement ferroviaire sur le chantier.

Pour permettre la meilleure gestion de ces deux ensembles de risques principaux, il a été imaginé dès l’origine du projet un Plan général de coordination (PGC) dans lequel le chantier est considéré comme un environnement



1- Guide support des trains suiveurs.

1- Support guide for backup trains.

© BOUYGUES

DES TRAVAUX CONSÉQUENTS

- Agrandissement du tunnel ferroviaire par abaissement de la voie.
 - Régénération de l'ouvrage consistant dans le rejointoiement des maçonneries et dans le confortement de certaines zones de piédroits.
 - Travaux de génie civil avec la reconstruction du drain central, la réalisation de plus de 85 niches de sécurisation, la pose de 14 km de caniveaux, d'un réservoir incendie et de ses locaux techniques, devant faciliter l'intervention des équipes de secours dans le cas d'éventuels incidents.
 - Travaux d'équipement avec la pose de plus de 100 km de câbles de puissance et de communication dans les caniveaux et en piédroits, de l'éclairage du tunnel, de l'équipement des niches, d'une conduite incendie de 7 km raccordée au réservoir.
- Montant des travaux côté France : 107,8 millions d'euros.



2

2- Entrée du tunnel début du XX^e siècle.
3- Entrée du tunnel aujourd'hui.



3

2- Tunnel entrance at the beginning of the 20th century.
3- Tunnel entrance today.

clos vis-à-vis de l'extérieur : une seule entrée côté France, le chantier étant fermé par un bloc béton à la frontière, associé à un mur virtuel qualifié d'infranchissable en son axe. Pour limiter les risques exportés par les travaux vers l'environnement ferroviaire, une notice de sécurité ferroviaire a été établie. Elle rappelle un certain nombre de consignes élémentaires et de règles d'installation des chantiers. Les intervenants évoluent ainsi à l'abri d'une muraille virtuelle matérialisée soit par une barrière d'entrevoie soit par un écran rigide. Ces éléments doivent permettre de préserver à la fois les intervenants des risques importés par la circulation ferroviaire mais aussi les trains commerciaux de l'activité travaux (photo 5).

Cette approche va très vite montrer ses limites du fait de la géométrie variable du tunnel qui ne permet pas pendant toute la durée des travaux de maintenir, sur l'ensemble des 7 km, la limite de la zone dite dangereuse à une distance de 1,25 ml de la voie en circulation. De plus, cette muraille virtuelle ne répond pas à deux problématiques particulières, à savoir la gestion d'une fuite de gaz sur un train fret ainsi que la gestion des entrées de personnes

« LA RÉALISATION DES TRAVAUX SOUS CIRCULATION FERROVIAIRE EST UNE CONTRAINTE DE TAILLE »

depuis l'Italie. Aussi, pour limiter l'impact de ces deux risques, l'entrée française du tunnel est équipée d'une lampisterie (photo 6).

La finalité de cette installation est de distribuer à l'ensemble des intervenants du chantier France les Apeva (appareils respiratoires) et les détecteurs de gaz, en plus des équipements de protection individuelle habituels. Ce matériel portable doit permettre aux intervenants en cas d'incendie mais aussi de fuite de gaz de rejoindre à pied l'un des quatre refuges aménagés dans le tunnel, tous équipés de réserves d'air respirable en bouteille. Les secours sont assurés par l'antenne de Modane des services du SDIS 73 qui ont été dotés par RFF de camions rail-route spécialement conçus pour le tunnel ferroviaire du Mont-Cenis - Fréjus. Capables de résister à des températures élevées, ces engins peuvent comme leur nom l'indique rouler sur la route comme sur les rails et intervenir dans des opérations de secours à personne, d'extinction incendie et dans le cas de risque chimique. Le groupement d'entreprises doit, pendant toute la durée des travaux, maintenir en service un accès à ces matériels en cas d'incident relatif à la circulation commerciale ou aux travaux.

DISPOSITIONS SUPPLÉMENTAIRES DE SÉCURITÉ

D'autres dispositions prévues au marché sont mises en œuvre dont la principale est l'utilisation maximale de locomotives équipées de système d'extinction automatique. Il s'avère en effet que les locomotives sont les sources potentielles d'incendie les plus importantes au vu de la quantité de carburant transporté dans les réservoirs.

La ventilation du tunnel du Fréjus est renforcée. Outre la ventilation naturelle de par la conception d'origine de l'ouvrage qui n'a pas évolué depuis 150 ans, des ventilateurs au nombre de 7 permettent d'assurer en permanence une vitesse de déplacement de l'air de 1 m par seconde dans un sens ou dans l'autre. Ils ont été installés dès le début des travaux sur les premiers kilomètres côté France. Efficace dans presque 99 % des cas, cette installation ne permet pourtant pas de contrebalancer l'arrêt de la circulation d'air en tunnel, constaté lorsque l'équilibre de pression s'installe entre les deux entrées française et italienne du tunnel long de 14 km. La qualité de l'air est suivie en permanence à l'aide de détecteurs portables distribués aux



© BOUYGUES

différentes équipes travaux et agents SNCF qui disposent ainsi -en complément des masques, Apeva, bouteilles d'air embarquées sur les trains travaux ou disponibles dans les refuges- d'une panoplie d'outils nécessaires pour prendre les dispositions adéquates en cas de pic de pollution ou incendie (arrêt momentané des activités, évacuation du tunnel...) (photo 7 et figure 8).

DES TRAVAUX « ORDINAIRES » DANS UN ENVIRONNEMENT EXTRAORDINAIRE

À priori, les travaux à réaliser n'ont rien d'extraordinaire si ce n'est leur environnement, qu'il soit physique ou humain. Car en permanence, la définition des chantiers élémentaires décrite ci-après doit répondre à plusieurs interrogations. Comment installer un chantier élémentaire et exécuter les travaux sans :

- Engager le gabarit ferroviaire ;
- Déstabiliser la voie sous circulation ferroviaire ;
- Endommager les installations indispensables à l'exploitation de la ligne ;
- Empoussiérer et/ou polluer le tunnel ;
- Déclencher un incendie ;
- Retarder un TGV ou tout autre train commercial ;
- Provoquer un incident de circulation entre les trains travaux, les personnels en poste et les matériels de chantier ;
- Subir l'impact des obtentions ou

annulations des périodes de « simultanées » indispensables à une bonne logistique ?

Sachant que le tunnel n'a qu'une entrée, qu'il est long de 7 km, que la voie ferrée n'est disponible que 4h30 maximum par jour et qu'il s'agit de travaux de rénovation avec tous les imprévus inhérents à ce genre de travaux. Dans cet environnement « particulier », les travaux réalisés par le Groupement d'entreprises ont débuté le 5 mars 2007 et il est à ce jour prévu qu'ils s'achèvent au cours du second trimestre 2010.

La traction est assurée par du matériel Colas Rail Voie et VFLI (filiale groupe SNCF) avec des locomotives V211, V212 et G1206 remotorisées pour limiter les émissions polluantes.

LES TRAVAUX DE RÉGÉNÉRATION DE MAÇONNERIE

Ces travaux concernent :

- La réalisation d'ancrages de renforcement en piédroits sur 2 zones : l'une longue de 20 ml ayant une singularité (2 lignes de boulons HA 32 de 4 ml de long tous les ml) et la seconde longue de plus de 3 100 ml, au droit de la zone de plus fort abaissement (1 ligne de HA 32 de 2 ml de long tous les ml) ;
- La réalisation après décapage à la haute pression d'une coque en béton projeté de 8 cm d'épaisseur en béton RIG fibré sur tout le développé, sur 4 zones représentant un linéaire de

332 ml, avec l'objectif de stabiliser des zones de maçonneries dégradées ;

→ Le rejointoiement de 16 000 m² de maçonnerie répartis sur 30 % des 7 km du tunnel. Le dégarnissage ou repiquage des joints dégradés est réalisé en fonction des surfaces à traiter (zones variant de 5 m² à 500 m²) depuis des trains travaux, soit à l'aide d'un robot d'hydro-démolition (au-delà de 200 m²), soit manuellement avec des marteaux piqueurs électriques (en-deçà de 200 m² ou accessibles en piédroit à hauteur d'homme). Une fois dégamis, les joints sont remplis avec un mortier épais. L'objet de ces travaux est de recréer une liaison mécanique entre les maçonneries et d'améliorer l'étanchéité de la voûte. À ce jour, il reste à traiter 7 000 m² sur la voie 1.

LES TRAVAUX D'AUGMENTATION DU GABARIT

L'objet de ces travaux

Pour obtenir l'augmentation de gabarit nécessaire (conforme au grand gabarit GB1), la solution retenue consiste à abaisser le niveau de la voie pour limiter au minimum les travaux en voûte pouvant générer des désordres. La hauteur d'abaissement de la voie varie donc entre quelques centimètres et 60 cm. Une coupe longitudinale du tunnel côté France montre les différentes géologies rencontrées pendant ces travaux.

L'évolution du phasage des travaux

Le phasage des travaux à la charge du Groupement d'entreprises se décompose en quatre phases principales qui s'inscrivent dans une programmation binationale franco-italienne plus générale des travaux de modernisation du tunnel du Mont-Cenis - Fréjus :

→ **Phase 1** : installation et traitement de la voûte (rejointoiement et béton projeté).

→ **Phase 2** : dépose de la voie de la frontière vers l'entrée du tunnel, abais-

sement de la plate-forme rocheuse de l'entrée France vers la frontière et réalisation des niches en aval de l'atelier d'abaissement sur la voie n°2 -pendant que la voie 1 restait sous circulation- puis pose de la nouvelle voie et enfin mise en place des équipements du tunnel en piédroit et dans les niches.

→ **Phase 3** : traitement symétrique de la voie n°1, la voie 2 ayant été préalablement rendue à la circulation des trains commerciaux.

→ **Phase 4** : repli et mise en service des nouvelles installations.

Après l'enlèvement du ballast dont l'épaisseur moyenne est de l'ordre de 25 cm, le déroctage est réalisé avec une machine à attaque ponctuelle tractant un train suiveur (photo 12).

À l'origine du projet, l'enlèvement des matériaux est en effet prévu à l'aide d'un train à voie métrique (logique d'un tunnelier). Ce choix devait permettre d'affranchir le poste déroctage de la plate-forme de l'ensemble des contraintes inhérentes à l'emploi de trains-travaux classiques.

Mais très vite, la mise en œuvre d'un train à voie métrique se heurte à des problématiques d'analyse de risque, d'obtention d'agrément ainsi qu'à la découverte d'une zone d'abaissement particulière à l'entrée du tunnel, devant faire l'objet d'un traitement particulier, nécessitant des reprises en sous-œuvre de la voûte. Après quelques centaines de mètres, la solution de la voie métrique est abandonnée au profit d'une solution classique utilisant les trains-travaux, pour répondre à l'ensemble des problématiques mises à jour et d'en limiter l'impact en termes de programmation. Une fois les voies déposées, différentes difficultés se révèlent :

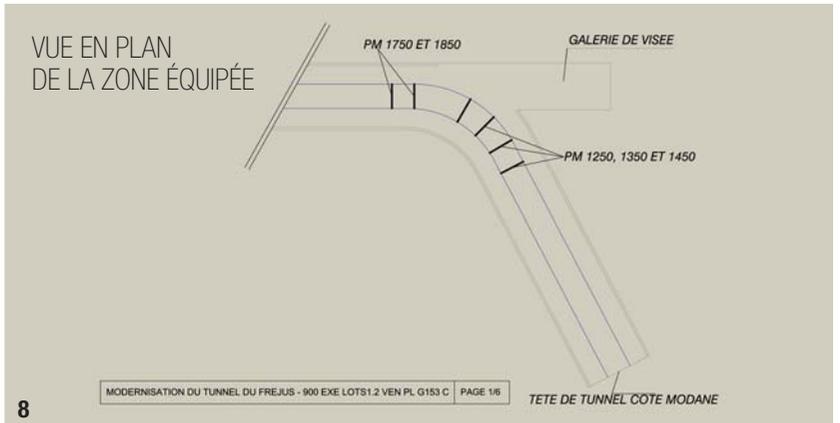
→ Le drain central qui doit assurer la butée de la voie circulée ne le fait pas sur l'ensemble du tracé. En effet, le drain a fait l'objet au cours des 150

ÉQUIPEMENTS EN PHASE PRÉPARATOIRE

Les travaux préparatoires auront consisté dans la pose d'un réseau d'eau sur les 7 km du tunnel côté France, la pose de luminaires tous les 10 ml, d'un câble BT 1000 Volts et d'un câble HT de 20 000 Volts ainsi que 7000 ml de barrière d'entrevoie matérialisant la séparation de la voie chantier et de la voie circulée.



7



8

précédentes années de divers travaux d'entretien et de réfection. Sa structure apparaît hétérogène dans sa nature et variable dans ses dimensions et son implantation. La réalité du drain va faire l'objet d'une reconnaissance systématique sur l'ensemble des 7 km pour être ensuite renforcé, comblé, démolit, etc... en fonction des différents cas de figures mis au jour (photo 13 - figure 14).

→ À l'entrée du tunnel creusé dans des éboulis, une contre-voûte est découverte sur plus de cent mètres. L'abaissement ne peut être réalisé avec la dérocteuse. La zone doit faire l'objet d'un traitement particulier impliquant des reprises en sous-cœuvre condamnant l'accès par la voie de chantier (photo 15 et figure 16).

→ La roche de quartzite prévue fracturée en plate-forme s'avère massive, et si le déroctage à la machine ponctuelle reste possible, du fait de la puissance de 300 kW développée par la tête, l'extrême abrasivité mesurée condamne la méthode au bout de quelques mètres. Le quartzite est finalement miné sur 60 cm d'épaisseur et 500 ml de long en prenant soin de n'endommager ni l'ouvrage ni la voie circulée. Cette dernière est rendue à la circulation dans l'heure qui a suivi le tir (photo 17).

→ La découverte d'une faille d'une dizaine de mètres entre les horizons de quartzite et d'anhydrite. La zone est remblayée puis bétonnée pour permettre le passage de la dérocteuse.

→ La découverte d'amiante dans le ballast qui conduit les intervenants à procéder au retrait des zones concernées conformément à la législation en employant des entreprises spécialisées. Pour limiter l'impact sur le délai global des travaux, les travaux d'abaissement devant la dérocteuse et son train suiveur étant bloqués par les problématiques successives de la zone d'entrée, du ballast amianté, de la roche quartzite ▷

4- Circulation commerciale.

5- Coupe type du tunnel avec barrière à 1,25 m de la voie de circulation.

6- Lampisterie.

7- Coupe type du tunnel avec ventilateur.

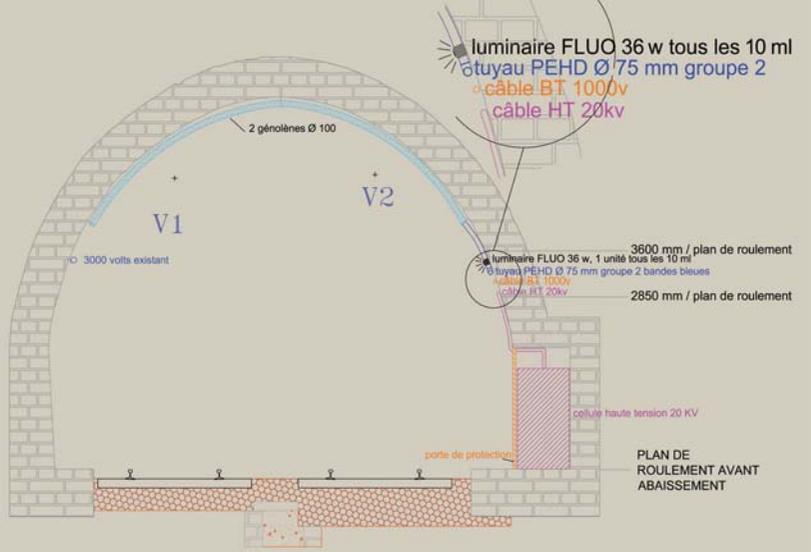
8- Vue en plan de la zone équipée.

9- Coupe type tunnel avec équipements.

10 et 11- Rejointoiement de maçonnerie à l'aide de robots.

12- Machine à attaque frontale « Alpine » et trains suiveurs.

COUPE TYPE TUNNEL AVEC ÉQUIPEMENTS



9



10



11



12

4- Commercial traffic.

5- Typical cross section of the tunnel with barrier 1.25m from the track.

6- Lamp room.

7- Typical cross section of the tunnel with fan.

8- Plan view of the equipped area.

9- Typical cross section of tunnel with appurtenances.

10 et 11- Masonry repointing by robots.

12- 'Alpine' full-face tunnelling machine and backup trains.



13



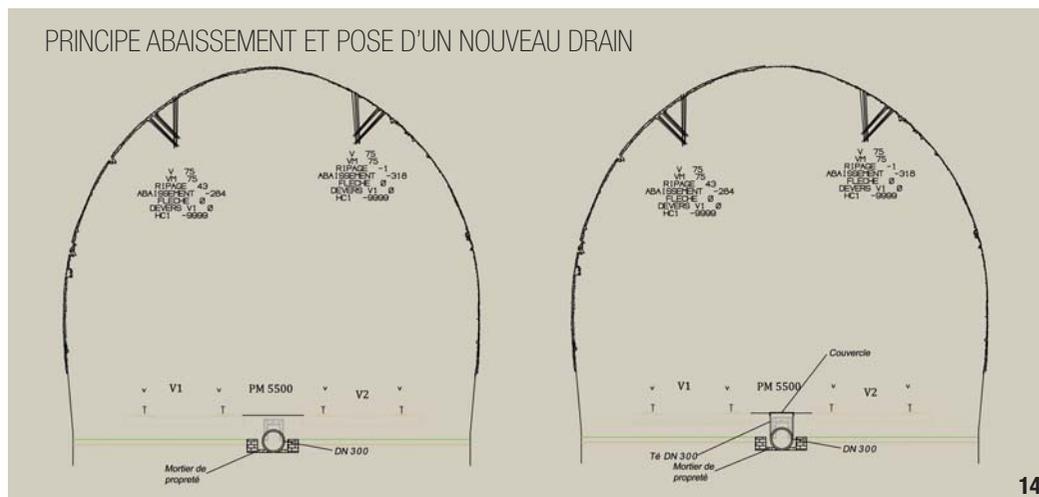
15



17

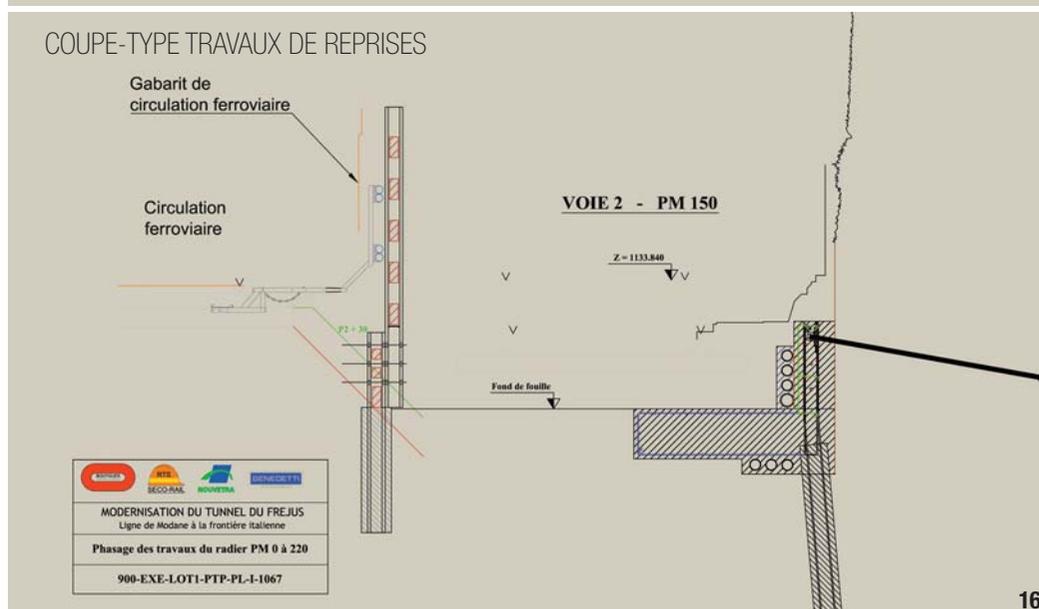
© BOUYGUES

PRINCIPE ABAISSEMENT ET POSE D'UN NOUVEAU DRAIN



14

COUPE-TYPE TRAVAUX DE REPRISES



16

13- Travaux drain central.

14- Schéma drain central.

15- Reprises en sous-œuvre de la contre-voûte.

16- Coupe-type travaux de reprises.

17- Travaux de minage du quartzite.

18- Excavation de la plate-forme au brise-roche hydraulique.

19 et 20- Méthode DMX pour l'excavation des niches.

13- Work on central drain.

14- Diagram of central drain.

15- Underpinning the inverted arch.

16- Typical cross section of underpinning work.

17- Quartzite blasting work.

18- Excavation of the subgrade by hydraulic rock breaker.

19 et 20- DMX method for excavation of recesses.

PRINCIPAUX ACTEURS PARTIE FRANÇAISE (LONGUEUR 7 KM)

MAÎTRISE D'OUVRAGE : RFF

GROUPEMENT MAÎTRISE D'ŒUVRE : SNCF - Systra

GROUPEMENT ENTREPRISES : Bouygues Travaux Publics (mandataire)

• LOT 1 « GÉNIE CIVIL » : Bouygues Travaux Publics, Colas Rail, Nouvetra, Benedetti

• LOT 2 « ÉQUIPEMENT » : Etdé, Spie et Imet



et de stabilité du drain central, une première passe de terrassement des zones de plus grande profondeur est réalisée avec des pelles équipées de brise-roche hydraulique (BRH) (photo 18). Un train de 8 pelles de 8 et 13 tonnes est ainsi mis en œuvre. Il va permettre de traiter plus de 60 % du volume à excaver de la voie 2 sur plus de 5 km, la dérocteuse n'ayant plus, une fois les obstacles franchis, qu'à venir finir la plate-forme et le piédroit.

Une fois la plate-forme excavée, elle est compactée, des mesures de portances sont réalisées. Dans certaines zones, en fonction de la qualité du rocher et de l'importance des venues d'eau, un géotextile type AR 20 est mis en œuvre. Ce géotextile développé par la SNCF a les caractéristiques suivantes : 20 ans de garantie, résistance à l'abrasion des constructions ferroviaires...

LES TRAVAUX D'EXCAVATION DES NICHES

Plus de 85 niches de différentes natures sont à réaliser dans le cadre des travaux de modernisation et de sécurisation du tunnel ferroviaire du Mont-Cenis - Fréjus. Ces niches n'ont pas vocation à accueillir des usagers mais à recevoir les nouveaux équipements de signalisation, de sécurité et de lutte contre l'incendie.

Dès l'origine du projet, le minage à l'explosif des niches n'est pas retenu. La fracturation naturelle ou apparue lors du percement du tunnel doit permettre de l'éviter. Aussi, la solution retenue est la méthode DM, en complément du brise-roche hydraulique (sur pelle ou brokk). Cette méthode DMX consiste à injecter une mousse sous une pression de 300 bars dans des trous de forage de 50 mm de diamètre et 50 cm de long. Cette méthode permet d'éclater la roche. Si la méthode s'avère efficace sur les premières niches, elle se trouve

très vite limitée du fait des résistances observées du rocher, associées à une absence ou une très faible fracturation. Seuls 30 % des niches de la première voie seront finalement réalisés avec la méthode DMX (photos 19-20).

Dans le quartzite, la méthode DMX atteint ses limites. Le rendement chute à des valeurs d'excavation de l'ordre de 50 litres/h soit 10 fois moins que les rendements obtenus sur les premières niches.

La solution finalement mise en œuvre va consister à miner les niches à l'explosif, avec toute la problématique induite par le fait que le tunnel reste sous exploitation ferroviaire (photos 21-22). Cela implique plusieurs contraintes :

→ Le tir doit être réalisé pendant la période simultanée, ce qui inclut l'approvisionnement des explosifs et le contrôle du résultat du tir avant le rendu de la simultanée (pas d'imbrulé et évacuation des explosifs non utilisés par le fournisseur).

→ Le tir ne doit pas endommager la voûte du tunnel, la voie et les installations nécessaires à l'exploitation, ni les installations de chantier.

→ Les volumes de gaz et de poussière dégagés lors du tir doivent pouvoir être évacués par la ventilation du tunnel avant le rendu de la simultanée.

Compte tenu de ces contraintes :

→ Un plan de tir séquencé non électrique est défini pour limiter les vibrations sur la voûte et les voies. Les volées ont une longueur de 1,5 ml et consomment environ 50 kg d'explosifs. Les tirs font l'objet d'enregistrement sismique. Les vibrations mesurées resteront en dessous des valeurs « seuil ».

→ Le plan de tir est de fait établi avec un minimum de quantité d'explosif, ce qui conduit à limiter la quantité de gaz émis à un volume de l'ordre du m³.

Les mesures de contrôle réalisées après chaque tir confirmeront les fai-

bles quantités de gaz émis.

→ La protection consiste dans la mise en place d'un écran souple capable d'absorber l'onde de choc et d'éviter la projection de débris sur les parements du tunnel et les matériels installés.

REMPACEMENT DES VOIES ET BALLAST

→ Le ballast, les rails et les traverses sont soit des fournitures de RFF (ballast et rails), soit des matériaux prescrits par RFI (traverses). Il est mis en œuvre par les équipes de Colas Rail. Une première sous-couche de ballast est mise en œuvre sur une plate-forme dont on se sera assuré de la qualité de la portance en réalisant des mesures de portance. Une fois la sous-couche en place et compactée, la pose de la voie proprement dite peut débuter.

Elle peut être réalisée soit par panneaux soit classiquement.

Dans le premier cas, il s'agit de reposer les panneaux de voie de 18 ml de long dans l'ordre où ils ont été déposés pour tenir compte des courbes. Une fois les panneaux en place, les coupons de voie de 18 ml de long sont démontés pour être remplacés par des LRS (long rail soudé) de 240 ml de long.

Dans le second cas, il s'agit de poser les traverses à l'aide d'un palonnier (4 traverses à la fois) écartées de 60 cm. Une fois les traverses posées sur un linéaire suffisant, les LRS sont mis en place.

Si la première méthode dite par panneaux est plus rapide en termes d'atelier de pose, elle nécessite de la place pour préparer et/ou stocker les panneaux et oblige à respecter le sens de dépose lorsqu'il s'agit de panneaux ▷

LA SOUDURE ÉLECTRIQUE, UNE PREMIÈRE EN FRANCE

Habituellement, les tronçons de rails sont raccordés en voie par soudure aluminothermique. Le tunnel du Mont-Cenis - Fréjus étant sous exploitation italienne, les rails côté France sont raccordés selon la méthode italienne qui préconise des soudures électriques. Aussi, Colas Rail qui a en charge les travaux de voie, a-t-elle fait appel à une entreprise italienne CLF pour réaliser ces travaux. Le principe repose sur la fusion des deux extrémités des tronçons obtenue grâce au passage d'un fort courant électrique dans le fer constituant le rail. Un camion rail route a été spécialement conçu à cet effet. Cet outil a permis d'obtenir des cadences de soudure de l'ordre de 4 unités à l'heure. Mais si la durée de soudure en elle-même est fortement réduite, cette nouvelle méthodologie a un fort impact sur l'organisation des chantiers, tels qu'ils sont réalisés dans le cas de l'utilisation de la soudure aluminothermique. En effet, chaque soudure raccourcit le rail de 5 cm environ. La voie doit donc être complètement libérée sur la longueur du tronçon à souder, ce qui nécessite de prévoir des éléments de rail complémentaire pour compenser cette disparition de matière. Ainsi les JIC (joints isolants collés) doivent être posés après et soudés en aluminothermique pour éviter qu'ils se déplacent.



21



22



23

© BOUYGUES

récupérés. Cette première méthode va s'avérer peu compatible avec des changements de traverses au cas par cas (traverses non récupérables). Si la seconde méthode est moins rapide en cadence de pose de traverse, elle s'avère bien plus souple pour gérer les aléas d'un chantier comme celui du Fréjus (remplacement d'environ 10 % des traverses usagées réparties aléatoirement sur la longueur de l'ouvrage).

LES TRAVAUX D'ÉQUIPEMENT

Les nouveaux équipements installés dans le tunnel consistent essentiellement dans des aménagements devant permettre une plus grande sécurisation des transports. Il s'agit d'installer un éclairage sur le linéaire du tunnel, des points de lumière tous les dix mètres, une sonorisation permettant de diffuser des messages par haut-parleur dans le tunnel, une nouvelle installation de téléphonie ferroviaire et d'alerte, une nouvelle installation de signalisation, ainsi que la pose d'un système de lutte incendie sur l'ensemble du linéaire, le tout raccordé à une réserve d'eau incendie de 240 m³ installée dans la galerie de visée.

Cette galerie est une partie abandonnée du tunnel qui a servi lors du creusement, pour caler l'alignement du tunnel pendant les travaux de creusement. L'ensemble de ces nouvelles installations est piloté par une GTC (Gestion technique centralisée) qui contrôle en permanence le bon fonctionnement du système de sécurisation. Ces travaux sont réalisés par un groupement d'entreprises Etde, Spie et Imet.

CONCLUSION

Les travaux de sécurisation et de modernisation du tunnel ferroviaire du Mont-Cenis - Fréjus concentrent une variété de travaux de rénovation dans un espace linéaire clos de 7 km de long, maintenu en service d'exploitation. Si chacune des tâches présentées dans cet article sont ordinairement réalisées seules sur des ouvrages en ligne sous circulation ou hors circulation, leur concentration dans l'espace et le temps, la singularité transfrontalière de cet ouvrage très long vieux de 150 ans ainsi que les nombreuses techniques innovantes déployées font de ce chantier un chantier exceptionnel. □

**21 et 22-
Excavation
des niches
à l'explosif.
23- Soudure
électrique
des rails.**

**21 et 22-
Excavation
of recesses
by explosive.
23- Electric
welding of
rails.**

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

LONGUEUR DU TUNNEL : 14 000 ml
LONGUEUR DU CHANTIER CÔTÉ FRANCE : 6 900 ml
**NOMBRE DE PERSONNES PRÉSENTES
SUR LE CHANTIER : 150 personnes**
DÉBLAIS - BALLAST : 20 000 m³
DÉBLAIS - ROCHEUX EN RADIER : 20 000 m³
REJOINTOIEMENT : 16 000 m²
**NICHES DE SÉCURISATION ET DE SIGNALISATION :
88 unités soit environ 2 000 m³**
RENOUVELLEMENT VOIE BALLAST : 17 700 ml

PRINCIPAUX MATÉRIELS

ROBOT D'HYDRO-DÉMOLITION : 1
DMX : 2
MACHINE À ATTAQUE PONCTUELLE 300 KW : 1
LOCOMOTRICES : 6 Colas Rail et 2 VFLI
PELLES BRH : 12
BROC 330 : 3
FOREUSE : 3
BI-GRUE : 1
BOURREUSE 109 : 1
WAGONS R9 : 40

ABSTRACT

MONT-CENIS/FRÉJUS RAIL TUNNEL: STRATEGIC RAILWAY MODERNISATION

RACHID KEBBAJ, BOUYGUES TP

The modernisation work on the Mont-Cenis/Fréjus rail tunnel

is being carried out as part of modernisation work and enlargement of the structure gauge for freight operations in 19 tunnels on a route going from Dijon to Turin via Modane. This strategic trunk line contributes to the development of goods transit between Northern Europe, France and Italy, and enables travel between Spain and Hungary via France and Slovenia. □

TÚNEL DEL MONT-CENIS – FRÉJUS: UNA MODERNIZACIÓN FERROVIARIA ESTRATÉGICA

RACHID KEBBAJ, BOUYGUES TP

Los trabajos de modernización del túnel ferroviario del Monte Cenis

– Fréjus se inscriben en el marco de la modernización y de la puesta al gran galibo cargas de 19 túneles en un itinerario que va desde Dijon a Torino pasando por Modane. Este eje estratégico participa en el desarrollo del tránsito de mercancías entre Europa del Norte, Francia e Italia y permite unir España con Hungría pasando por Francia y Eslovenia. □