

La revue technique des Travaux Publics

Travaux

n°855
Septembre 2008



TRAVAUX SOUTERRAINS

- L'ingénierie des systèmes complexes dans les tunnels
- Sécurisation du tunnel Maurice Lemaire
- La ligne 4 fait route vers Montrouge
- La station de São Sebastião (Lisbonne)
- Étude de dangers (incendie) en travaux souterrains
- Solutions routières pour un tunnel ferroviaire
- Un tunnel ferroviaire au nord du Portugal
- Construction du collecteur - Carré de Soie - (Grand-Lyon)
- Tunnel des Grands Goulets. Priorité à la sécurité

Travaux souterrains

éditorial

Travaux Publics : pérenniser les efforts des entreprises à l'international

En 2007, les principaux groupes français de construction actifs à l'international ont réalisé un chiffre d'affaires international de 24,46 milliards d'euros¹, en progression de 22,4 % par rapport à 2006. Cette performance est liée d'une part à la conjoncture particulièrement favorable qui a prévalu en 2007 au niveau mondial dans le secteur de la construction et, d'autre part, à la dévalorisation du dollar par rapport à l'euro.

Les activités internationales des entreprises françaises, traditionnellement très présentes sur les marchés extérieurs, représentent une part toujours importante de leur chiffre d'affaires avec 35,9 % en 2007.

Si cette proportion est en hausse comparée à l'an passé, elle reste inférieure au niveau de la fin de la dernière décennie en raison notamment de deux phénomènes conjoncturels simultanés : un marché domestique porteur et un environnement concurrentiel croissant sur les marchés extérieurs, conjugué à la volonté des groupes de limiter les risques à l'international.

Dans le but de pérenniser les efforts des entreprises françaises à l'international, la FNTP vient de signer une convention de partenariat avec Ubifrance, l'agence nationale de soutien à l'export. Dans le cadre de cette convention, Ubifrance et le réseau des missions économiques réaliseront des études sur le secteur des infrastructures et assureront une veille sur l'évolution des marchés susceptibles de rencontrer l'offre française dans six pays cibles : l'Allemagne, l'Espagne, la Pologne, la Roumanie, le Maroc et les Émirats Arabes Unis. Parallèlement, des missions d'accompagnement des entreprises sur le terrain seront organisées.

Des actions spécifiques seront également menées : examiner les possibilités et conditions de portage des entreprises, développer le recours aux VIE (Volontaires internationaux en entreprise), mieux faire connaître des adhérents les soutiens publics à l'export.

Au sein de la FNTP, c'est le Service International/SEFI (Syndicat des entrepreneurs français internationaux) qui sera en charge de la mise en œuvre de ce dispositif. Il veillera notamment à en informer l'ensemble des entreprises membres de la FNTP et plus particulièrement les PME.

Si les entreprises majeures de la Profession accroissent sans cesse leur chiffre d'affaires à l'international, force est de constater que les PME sont très peu présentes à l'export. Il est donc nécessaire, dans un premier temps, d'identifier les PME susceptibles d'exporter leur savoir-faire et leurs capacités d'innovation à l'international afin de les impliquer fortement dans ce dispositif.

Un premier bilan de toutes ces actions sera établi début 2009.

1. Source : chiffres SEFI/Commission internationale de la FNTP, 44^e enquête sur la construction hors métropole.



Patrick Bernasconi
Président de la FNTP

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'P. Bernasconi', written in a cursive style.

Travaux souterrains : développer la Recherche et le Partenariat



Jean Philippe
Président de l'AFTES
(Association Française
des Tunnels et de l'Espace
Souterrain)

Chaque année, nous nous réjouissons que *Travaux* consacre un numéro entier aux Travaux souterrains, spécialité qui non seulement possède – au sein de la FNTP – son propre syndicat¹ mais qui est aussi l'objet de la création – en 1970 – de l'AFTES, Association Française des Travaux en Souterrain, devenue en 2006 l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, suite au regroupement des deux associations et au souci grandissant de promouvoir l'utilisation de l'espace souterrain – notamment en site urbain – dans un souci de développement durable.

Le lecteur trouvera naturellement dans ce numéro spécial une majorité d'articles classiques relatifs aux travaux de creusement de tunnels en France et à l'international (où nos entreprises se montrent très performantes) ; mais parmi les nombreux sujets qui gravitent autour du thème de l'espace souterrain, il en est un, primordial, celui de la sécurité, particulièrement de la sécurité au feu (l'incendie qui s'est déclaré le jeudi 11 septembre dernier dans le tunnel sous la Manche en est l'exemple le plus récent), traité ici à la fois aux niveaux étude et réalisation.

L'AFTES, aujourd'hui, mène son action sur deux axes principaux :

- l'élargissement de son domaine de recherche : ses 16 groupes de travail actifs – auxquels participent environ 250 membres – couvrent non seulement les différents sujets liés à la construction et à l'exploitation de tunnels et d'ouvrages souterrains mais aussi les aspects juridique, administratif, socio-économique, écologique. Ces groupes publient régulièrement leurs recommandations dans la revue bimestrielle officielle de l'AFTES « Tunnels et Ouvrages Souterrains » ;
- le développement d'échanges réguliers avec des associations-sœurs européennes (Belgique, Suisse, Italie, Espagne, Portugal) ainsi qu'avec

des partenaires français tels que la FSTT, la SIM, l'AFGC qui travaillent dans des domaines proches du sien.

Aujourd'hui, en Europe, des pays comme l'Italie, la Suisse, l'Espagne connaissent une activité importante dans le secteur de la construction des grands tunnels ferroviaires et des métros. En France, nous sommes dans une période d'attente de lancement de grands ouvrages (Lyon-Turin Ferroviaire, liaison Marseille-Gênes, etc.) mais, en revanche, nous avons une forte activité de rénovation et de modernisation d'ouvrages souterrains liée au fait que notre patrimoine, évalué à quelque 2 000 km d'ouvrages tels que tunnels routiers et ferroviaires, galeries hydrauliques, réseaux urbains, etc., nécessite une mise en conformité avec les nouvelles directives sur l'environnement. Nos entreprises ont, dans ce domaine de la réhabilitation, développé des techniques innovantes que, sans aucun doute, elles seront appelées à mettre en œuvre dans un proche avenir à l'international.

Les perspectives de développement de notre secteur sont encourageantes. À l'heure où nous écrivons, nous préparons activement notre congrès triennal de Monaco (6-8 octobre 2008) et nous attendons la décision des membres de l'Association Internationale des Travaux et de l'Espace souterrain (AITES) en réunion à Agra (Inde) du 22 au 24 septembre, pour la désignation de Lyon (en compétition avec Helsinki) comme ville hôte du Congrès annuel 2011 de l'AITES. Une victoire nous permettrait mieux encore de mettre en lumière l'étendue de nos activités et le dynamisme de nos entreprises... mais une défaite ne nous ferait pas ralentir notre rythme de développement... et ce ne serait que partie remise à plus tard !

Bonne lecture !

1. Syndicat Professionnel des Entrepreneurs de travaux Souterrains de France, présidé par Robert Longelin

L'ingénierie des dans les tunnels

Les tunnels font, depuis quelques années, l'objet d'études et d'analyses fonctionnelles élaborées conduisant à mettre en œuvre des systèmes complexes, ceci dans un objectif constant de recherche d'amélioration du niveau de confort et de sécurité.

Certains événements dramatiques tels que l'incendie dans le tunnel du Mont Blanc, ont accéléré le processus, mais la démarche était déjà engagée.

Le présent article décrit dans les grandes lignes la démarche pratique de l'ingénierie moderne de la sécurité et des systèmes et équipements des tunnels.

Une analyse plus détaillée est présentée sur des systèmes particulièrement importants du point de vue des enjeux de confort et de la sécurité : la ventilation sous l'angle des outils de calculs d'aide à la conception, les systèmes fixes de lutte contre l'incendie ainsi que les technologies de l'information et de la communication au service de l'exploitation et de la sécurité.

■ Introduction

Longtemps considérés avant tout comme des « ouvrages de génie civil équipés », les tunnels, routiers en particulier, sont conçus depuis quelques années selon une approche nouvelle assimilable aux méthodes déployées dans l'industrie, c'est-à-dire une « approche systèmes ». La prise de conscience du niveau de risque bien supérieur à celui de la circulation à l'air libre, l'évolution de la réglementation et l'amélioration de l'état de l'art ont contribué à ce que l'ingénierie de la sécurité se trouve désormais au cœur de la question et on ne saurait concevoir un ouvrage neuf ou rénover un tunnel en exploitation sans consulter au préalable les spécialistes de la sécurité et des systèmes. De même, les questions de l'exploitation et de la maintenance ont un impact important sur les dispositions projetées (figure 1).

Dossiers de sécurité, études spécifiques de dangers, sûreté de fonctionnement, AMDEC, analyses fonctionnelles... autant de concepts modernes intégrés dans la conduite des projets.

Un tunnel est, en effet, à considérer comme un système en tant que tel. Il s'agit de mobiliser les moyens techniques et humains permettant de développer la chaîne fonctionnelle de sécurité : « acquérir → traiter → reconnaître → superviser → agir ».

La réponse à ce besoin passe par la mise en œuvre d'un

ensemble de sous-systèmes, chacun devant répondre à une fonction particulière.

Par exemple, la recherche d'une qualité de l'air conforme aux exigences réglementaires passe par l'utilisation d'un système de ventilation performant; de même un désenfumage efficace contribue au respect des objectifs de sécurité.

Ventilation, éclairage, détection incendie, protection incendie, réseau d'appels d'urgence, signalisation dynamique, vidéosurveillance, détection automatique d'incidents, retransmission des radiocommunications..., autant de systèmes qui participent aux fonctions de confort et de sécurité, auxquels il faut ajouter les systèmes transversaux, tels que : alimentation et distribution de l'énergie, télécommunications, gestion technique centralisée et supervision.

Par ailleurs, les questions des interfaces génie civil/équipements restent un enjeu majeur dans le développement des études des ouvrages souterrains.

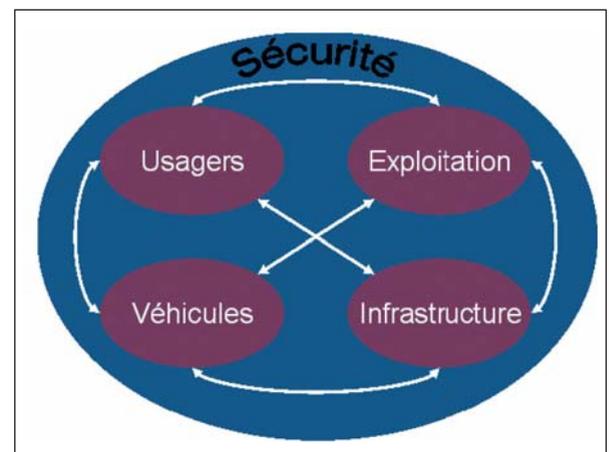
L'accroissement du niveau d'exigence des études des tunnels a ainsi conduit les sociétés d'ingénierie à renforcer leurs moyens humains et leurs outils d'aide à la conception et à l'analyse de la sécurité.

Cet article présente dans les grandes lignes la démarche pratique de l'ingénierie moderne de la sécurité et des équipements des tunnels routiers, telle qu'elle devrait être mise en œuvre pour réduire une partie des risques projet. Il ne s'agit pas de présenter une doctrine de conduite de projet neuf mais plutôt de sensibiliser (bien que ce sujet ait commencé à imprégner la profession depuis quelques années) l'ensemble des acteurs de la construction des infrastructures souterraines, à une nécessaire anticipation des études d'ingénierie des systèmes.

Figure 1

Schéma des relations fonctionnelles de sécurité

Diagram of safety functional relations



systemes complexes

Frédéric Hervé
Directeur de projets
Setec TPI

Alain Griveaux
Directeur de projets
Setec ITS

Une analyse plus détaillée est présentée sur des systèmes particulièrement importants du point de vue des enjeux de confort et de la sécurité de l'ouvrage : la ventilation sous l'angle des outils de calculs d'aide à la conception d'une part, les systèmes fixes de lutte contre l'incendie et les technologies de l'information et de la communication au service de l'exploitation et de la sécurité. L'ensemble est étayé d'exemples qui ne proviennent pas tous du même ouvrage. Enfin, le cas spécifique des tunnels ferroviaires est évoqué en fin d'article.

■ Depuis l'analyse du besoin jusqu'à la mise en exploitation

Déroulement d'un projet d'ingénierie de système tunnel

Le processus de déroulement du projet comprend les grandes phases majeures successives d'un projet d'installation industrielle. Il débute avec l'analyse de l'expression des besoins et s'achève à la « remise des clés » au client :

- mise au point d'un jeu de données;
- études d'ingénierie proprement dites (projet);
- choix des ensembleurs, sous-traitants, fournisseurs;
- études de détail des équipements et des systèmes;
- tests en usines, sur plates-formes;
- approvisionnements sur chantier;
- installation, tests unitaires;
- mise en service système par système;
- essais d'intégration;
- essais de réception client + essais de contrôle avec les autorités.

Le jeu de données d'entrée porte sur un ensemble de besoins et de contraintes générales ou spécifiques, parmi lesquelles :

- l'expression des besoins fonctionnels, c'est-à-dire le programme du client : données d'exploitation (typologie du trafic, type d'exploitation – unidirectionnelle, bidirectionnelle, bidirectionnelle exceptionnelle – taux de poids lourds, TMD...), environnement urbain ou non, objectifs de sécurité, objectifs de performance des systèmes, programme de l'exploitant/mainteneur (doit-on assurer l'entretien sans restriction de l'exploitation? peut-on profiter de fermetures de nuit?), considérations environnementales...
- le cadre réglementaire et normatif (règles nationales, UE, AIPCR);
- les données géométriques principales du projet (profil en long, profil en travers fonctionnel du point de vue routier);

- le mode de construction de l'ouvrage (tunnel creusé, foré au tunnelier, caissons immergés, tranchée couverte, voire assemblage de ces méthodes de construction);
- l'organisation des secours, les demandes particulières des services de secours;
- les nombreuses autres données : conditions météorologiques locales, contraintes architecturales particulières, problèmes particuliers de corrosion (pour les tunnels de montagne par exemple).

Toutes les données ne sont pas nécessairement fournies au démarrage du processus. Des données particulières peuvent être fournies ultérieurement à certains points clés des études. Enfin, le jeu de données ne constitue pas un ensemble figé. Des évolutions provenant de l'extérieur du processus, voire des modifications de données résultant des études elles-mêmes, ne constituent pas des événements exceptionnels.

Zoom sur le développement des études d'ingénierie

Les systèmes dont les dimensions impactent la conception des ouvrages

Le développement des études d'ingénierie des systèmes équipant les tunnels routiers passe d'une part par l'analyse détaillée des besoins de confort et de sécurité, et d'autre part par l'analyse des besoins fonctionnels d'exploitation et de maintenance.

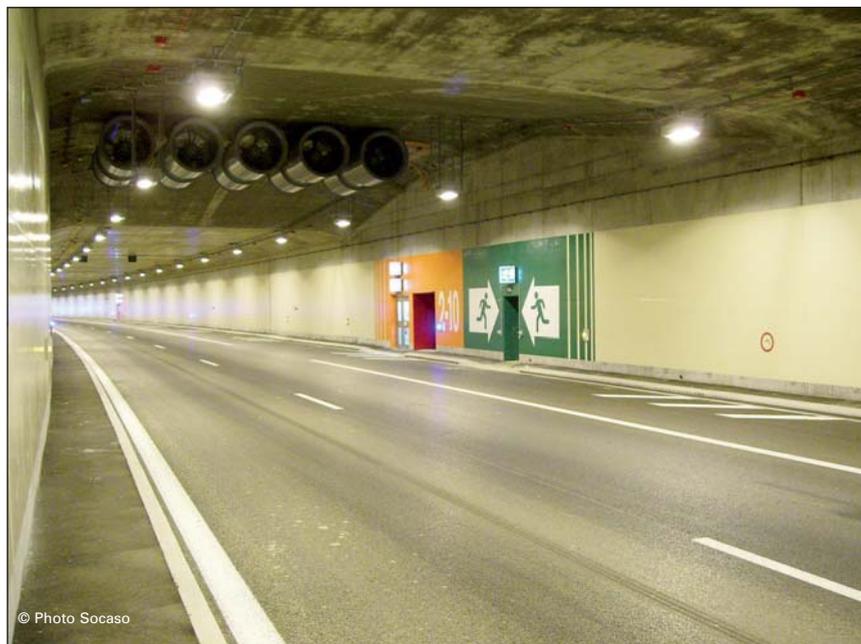
Un ouvrage harmonieusement conçu nécessite un développement coordonné des études préliminaires des systèmes ayant de forts impacts sur le génie civil : ventilation, évacuation des personnes, réseaux (câbles, tuyauteries).

On note en particulier :

- les études des interfaces principales génie civil/équipements : ventilation, distribution électrique, réseau de lutte contre l'incendie;
- l'intégration des dispositions liées à l'évacuation des usagers et à l'accès des secours;
- les conséquences sur la coupe en travers en section courante (gainés de ventilation, cheminement des câbles, des tuyauteries, multitubulaires, caniveaux techniques, chambres et regards), sur les besoins en locaux techniques (usines de ventilation, postes électriques, poste de contrôle commande...).

Ces études nécessitent plusieurs itérations combinant la conception de la ventilation, la conception des dispositifs d'évacuation et de sécurité et celle du profil en travers. À titre d'exemple, les volumes à réserver pour faire transiter l'air constituent une donnée de toute première importance pour l'étude du profil en travers du tunnel. Les surfaces réservées aux galeries de

L'ingénierie des systèmes complexes dans les tunnels



© Photo Socaso

Photo 1

Accélérateurs installés dans un bossage de la tranchée couverte du contournement d'Angers
Accelerators set up in an anchor block in the cut-and-cover tunnel of the Angers bypass

ventilation représentent ainsi de l'ordre de 20 % de la surface intérieure du tunnel. De même :

- les usines de ventilation nécessitent des volumes de plusieurs milliers de mètres cubes;
- des surgabarits locaux de l'ordre de 2 m sont à créer pour installer des accélérateurs dans les tranchées couvertes;
- pour les tunnels en zone peu urbanisée (montagne), l'absence de réseau de distribution d'eau peut imposer la création de deux bassins de réserve incendie (160 m³) dans des sites souvent escarpés, et fréquemment l'installation de surpression pour alimenter la conduite incendie.

Ces systèmes, non contents d'être gourmands en volume, sont également très énergivores. Le dimensionnement et la robustesse de l'alimentation et de la distribution électrique doivent donc être adaptés pour satisfaire ces gros consommateurs qui ne fonctionnent souvent qu'en cas d'urgence... mais tous en même temps.

Par ailleurs, les réflexions menées dans le cadre du développement de la politique de maintenance doivent intégrer les questions d'accessibilité aux équipements (avec ou sans restriction de la circulation) et proposer des solutions de redondance des systèmes et équipements (photo 1).

Le développement des études de sécurité

En parallèle des études des systèmes, les spécialistes de la sécurité doivent développer leurs propres analyses : analyse comparative de l'avant-projet au référentiel

réglementaire, analyses de sécurité (analyse fonctionnelle, études spécifiques des dangers, analyses quantitatives des risques). Ce dossier fait l'objet d'une expertise indépendante.

Les conclusions des études de sécurité et celles de l'expert peuvent conduire à proposer des dispositions constructives et/ou d'exploitation destinées à améliorer le niveau de sécurité. Ces conclusions sont à prendre en compte dès le développement des études de projet des ouvrages (génie civil et systèmes inclus).

Le développement coordonné des études des systèmes participant aux fonctions de confort et de sécurité

Sur la base des développements décrits ci-avant (analyse des données, études préliminaires des systèmes, études de sécurité), chaque système fait l'objet d'une étude détaillée, dans le cadre d'une gestion de projet coordonnée.

On peut classer ces systèmes en deux grandes familles : les systèmes liés à l'ouvrage lui-même, les systèmes directement liés à l'exploitation du trafic.

Systèmes liés à l'ouvrage en tant que lien routier :

- ventilation;
- éclairage;
- alimentation et distribution électrique;
- gestion technique centralisée;
- détections incendie;
- réseaux de lutte contre l'incendie (conduite incendie, systèmes fixes de lutte contre l'incendie);
- exhaure.

Systèmes liés à l'exploitation routière :

- réseau d'appel d'urgence;
- vidéosurveillance;
- détection automatique d'incidents;
- signalisation dynamique;
- retransmission radio;
- télécommunications;
- système d'aide à l'exploitation.

■ Les études de ventilation et les outils numériques d'aide à la conception

Ces études portent sur la ventilation des différents ouvrages confinés : tunnel lui-même, ouvrages de sécurité, locaux abritant des équipements techniques. En ce qui concerne la ventilation du tunnel lui-même, les concepts sont détaillés selon les deux besoins fondamentaux assignés au système de ventilation : la ventilation « de tous les jours » ou ventilation sanitaire, et la « ventilation en cas d'incendie », ou désenfumage.

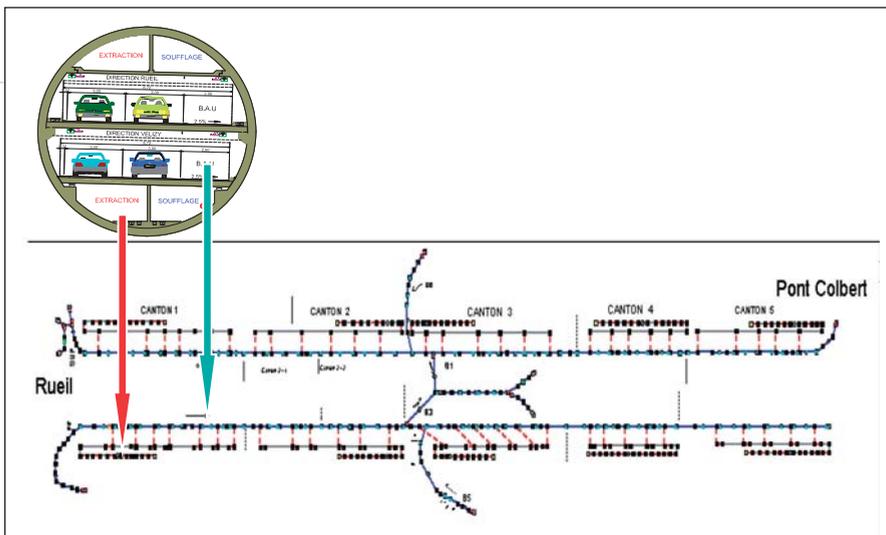


Figure 2

Modèle Express'Air (logiciel Setec) du réseau tunnel et gaines du tunnel à gabarit réduit de l'A86

Express'Air model (Setec software) of the tunnel network and ducts in the small-gauge tunnel on the A86 motorway

Si auparavant la ventilation sanitaire requérait plus de moyens que le désenfumage, cette tendance est inversée en Europe depuis les années 90 en raison de la baisse continue des émissions de polluants des véhicules d'une part et de la recherche d'un niveau de sécurité accru d'autre part.

Cet état de fait peut conduire, lors de la rénovation d'ouvrages, à réaffecter pour les nouveaux besoins de désenfumage des volumes et gaines autrefois dédiés à la ventilation sanitaire et vice-versa.

Il en découle aussi la mise en œuvre d'un plus grand nombre d'équipements destinés à n'être utilisés qu'en cas d'urgence, ce qui peut poser des difficultés d'exploitation.

Les outils numériques d'aide à la conception

Compte tenu du grand nombre de situations auquel peut être soumis le système de ventilation, tant dans sa fonction sanitaire que dans sa fonction de maîtrise des fumées en cas d'incendie, il est indispensable d'étudier de nombreux scénarios. Ces études mobilisent des outils informatiques d'aide à la conception puissants et rapides à la fois.

Ces études de scénarios constituent des aides précieuses à la conception dans les trois fonctions suivantes :

- le dimensionnement du système;
- l'analyse fonctionnelle du système qui servira d'entrant dans le développement des études de la gestion technique centralisée (GTC);
- l'analyse des « scénarios ESD ».

Les outils 1D

Ils permettent de se faire une bonne idée de la valeur des caractéristiques aérauliques (débit, pression, paramètres traceurs des conditions de confort, d'environnement de santé ou de survie). Ces grandeurs sont alors considérées comme homogènes dans la section

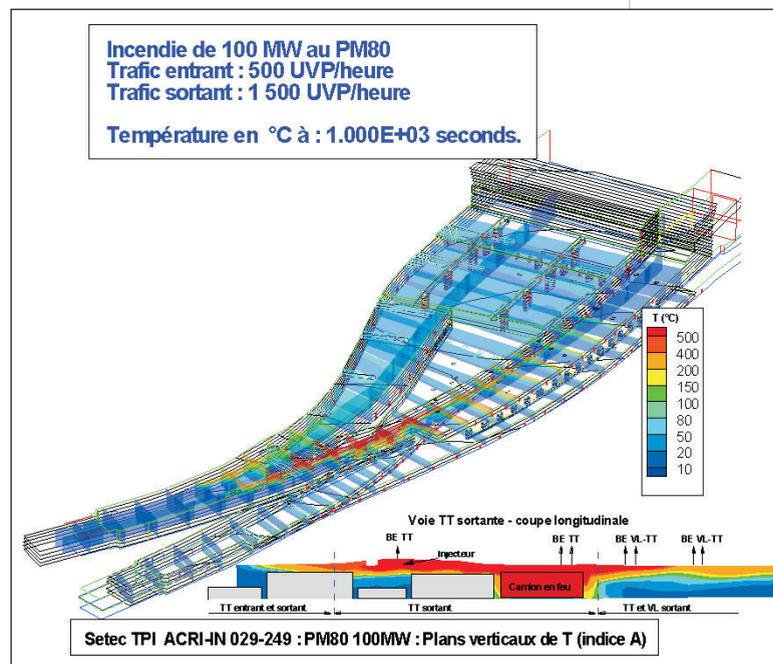


Figure 3

Modèle 3D de l'échangeur souterrain de Rueil du tunnel à gabarit réduit de l'A86

3D model of the Rueil underground heat exchanger in the small-gauge tunnel on the A86 motorway

transversale. Il est possible de réaliser des maillages de réseaux assez complexes (bretelles, gaines de ventilation).

Ces outils offrent la possibilité de faire varier un grand nombre de paramètres (contre-pressions aux têtes, trafic routier par exemple) et de tester la sensibilité des caractéristiques aérauliques aux variations de fonctionnement des actionneurs : ventilateurs, accélérateurs, injecteurs... (figure 2).

Les outils 3D

Ils sont essentiellement utilisés dans les études des cas d'incendie pour :

- compléter les analyses 1D dans la vérification de l'efficacité des systèmes d'extraction de fumées, et dans l'analyse des conditions de stratification des fumées (figure 3);



- évaluer les conditions d'environnement (température, toxicité, rayonnement) dans l'ouvrage dans les études de dangers (figure 4).
- Les outils 3D peuvent aussi être mobilisés à plus grande échelle dans le cadre des études de dispersion de l'air pollué aux têtes des tunnels ainsi qu'au niveau des unités de ventilation.

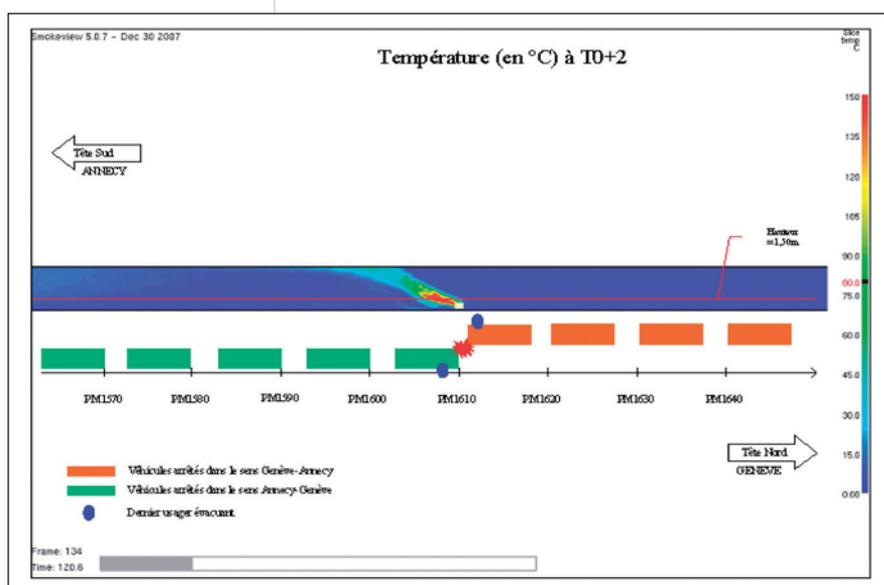


Figure 4

Modèle FDS (Fire Dynamic Simulator) pour un cas d'incendie dans le tunnel du Mont-Sion (A41)

FDS (Fire Dynamic Simulator) model for an occurrence of fire in the Mont-Sion tunnel (A41 motorway)

■ Les systèmes électromécaniques innovants

Compte tenu des retours d'expérience et de l'évolution des besoins, les systèmes électromécaniques équipant les tunnels font l'objet depuis plusieurs années d'améliorations continues et d'innovations.

Parmi les sujets qui font actuellement l'objet de développements opérationnels, les trois thèmes suivants reviennent de manière récurrente :

- les problèmes de qualité de l'air dans l'environnement des têtes de tunnels et des unités de ventilation et les solutions de traitement de l'air avant rejet dans l'atmosphère;
- le contrôle actif des mouvements d'air en tunnel pendant les scénarios de désenfumage;
- les systèmes fixes de lutte contre l'incendie.

En ce qui concerne plus spécifiquement les systèmes fixes de lutte contre l'incendie, la recherche d'une adaptation aux tunnels de ces technologies s'est développée rapidement en Europe au cours des dernières années afin de tenter de répondre au mieux aux risques intrinsèques de ces ouvrages et notamment les incendies de grande ampleur potentielle liée aux caractéristiques et au potentiel énergétique rapidement mobilisable des poids lourds.

Des retours d'expérience montrent que les systèmes mécaniques d'extraction des fumées, équipements primordiaux de sauvegarde des usagers, étant conçus réglementairement en France pour des incendies d'une puissance de 30 MW (hors TMD) ne peuvent répondre à certains incendies de poids lourds dont la puissance peut atteindre dans un très court délai un ordre de grandeur de 100 MW même en l'absence de TMD.

Ces systèmes permettent d'asperger à la demande et lorsque c'est nécessaire un incendie au moyen d'agents extincteurs, principalement : eau à gouttelettes de dimensions plus ou moins importantes et sous des pressions variables, mélange eau et émulseur (mousse) éventuellement enrichi de produit mouillant. Ils n'ont pas pour vocation d'éteindre un incendie mais plutôt de stopper puis réduire significativement sa courbe de puissance, de le confiner et donc de limiter, voire éviter les propagations mitoyennes.

Les motivations des maîtres d'ouvrage conduisant à entreprendre une démarche de recherche d'applicabilité de tels systèmes à leur tunnel sont multiples :

- recherche d'amélioration de la sauvegarde des usagers lors de leur auto-évacuation vers les abris en cas d'incendie dont les caractéristiques de puissance et d'évolution sont supérieures au scénario de dimensionnement;
- recherche de facilitation de l'accès des secours et de limitation des risques auxquels ces derniers peuvent être exposés lors d'une intervention sur incendie de forte puissance;
- recherche de la préservation de l'intégrité de la structure pendant l'incendie par une limitation de la sollicitation thermique à laquelle elle est exposée;
- recherche de réduction des dégâts à l'ouvrage et en conséquence des délais de fermeture imposés par les réparations consécutives au sinistre.

■ De l'ingénierie des technologies de l'information et de la communication au service de l'exploitation et de la sécurité

Les tunnels sont des milieux confinés dans lesquels la circulation des véhicules présente un niveau de risque bien supérieur à celui de la circulation à l'air libre. Tout incident, même mineur, peut rapidement engendrer un accident lui-même susceptible de générer des suraccidents, l'arrêt du flux de circulation et l'accumulation de véhicules et de leurs usagers dans un environnement pouvant très vite se dégrader (fumées, feux, paniques...).

Pour prévenir ces situations dramatiques, les centres de surveillance des tunnels disposent d'un certain nombre

de moyens permettant, autant que possible, de limiter le nombre d'incidents potentiels et d'intervenir au plus vite quand, néanmoins, un incident notable survient. La sécurité des tunnels routiers s'appuie ainsi, de plus en plus, sur la mise en place de systèmes complexes de surveillance du trafic et de surveillance des installations techniques mises en œuvre dans les ouvrages pour assurer leur fonctionnement dans les meilleures conditions.

Ces systèmes ont évolué de manière très importante, en particulier depuis l'accident dramatique du tunnel routier du Mont-Blanc en 1999, qui a mis en avant leur caractère indispensable pour les besoins d'une gestion rapide, efficace et coordonnée des interventions des secours.

Les systèmes aujourd'hui opérationnels dans les tunnels routiers sont couramment les suivants :

- la détection automatique d'incident (DAI) par analyse d'images qui permet de détecter les états anormaux du trafic (arrêt, congestion, incendie, fumée...);
- la vidéosurveillance fréquemment imbriquée avec la DAI et qui permet une visualisation de la totalité des espaces trafic ainsi que d'autres espaces sensibles, avec enregistrement numérique des images;
- le recueil automatique de données de trafic par analyse du passage des véhicules qui permet de détecter des états de trafic normaux ou anormaux (débit, vitesse, densité, congestion...);
- les systèmes de mesure de la qualité de l'air en relation directe avec les installations de ventilation et de désenfumage;
- les systèmes de détection incendie qui permettent, selon les cas, des détections en espaces trafic ou dans d'autres locaux;
- le système de contrôle des accès qui permet, par exemple, de détecter des ouvertures de portes de niches de sécurité ou de refuges et/ou de détecter des intrusions dans des locaux techniques;
- le recueil de données météorologiques qui permet de détecter les conditions d'environnement tout particulièrement en entrée et sortie des ouvrages (risque de verglas, gestion de la ventilation, etc.);
- la signalisation lumineuse fixe et dynamique qui permet notamment de transmettre aux usagers des informations de sécurité adaptées aux événements en cours (signaux d'affectation de voies, panneaux à messages variables textuels ou avec des pictogrammes, limitations de vitesse, signalisation des issues de secours...);
- la fermeture automatique des accès à l'ouvrage qui permet, en cas d'incident grave, de limiter le nombre de véhicule dans l'ouvrage;
- la retransmission radio sur les fréquences FM commer-

ciales qui permet de faire passer auprès des usagers les messages de sécurité;

- le réseau d'appel d'urgence (RAU) qui donne aux usagers la possibilité d'appeler directement les services de sécurité;
- les réseaux de télécommunication (de type téléphone, radio, informatique) qui permettent aux services de sécurité et de secours de communiquer entre eux;
- les équipements de gestion technique centralisée qui permettent de collecter en temps réel l'état des différents équipements techniques, de les surveiller et de la télécommander selon des scénarios prédéfinis, soit de façon automatique, soit après validation par des opérateurs;
- le système informatisé d'aide à l'exploitation (SAE) qui permet d'agrèger l'ensemble des sous-systèmes précédents pour présenter aux opérateurs un outil cohérent de gestion du trafic, de la sécurité, de la maintenance des ouvrages. Selon les contextes d'exploitation, le SAE est un outil mis à disposition des différents opérateurs au PC de surveillance, des intervenants mobiles, des intervenants extérieurs, etc. avec des fonctionnalités réparties selon les besoins. Le SAE est fréquemment en interface avec d'autres systèmes « supérieurs » notamment ceux des PC routiers régionaux et/ou des services aux usagers (informations radio, internet, GSM, etc.).

D'autres systèmes sont implantés de façon moins fréquente dans les tunnels mais sont susceptibles d'apparaître progressivement selon les besoins :

- système de détection des gabarits des véhicules avant accès aux ouvrages;
- portiques thermographiques de détection de points anormalement chauds sur les poids lourds;
- système de régulation du trafic au niveau des accès aux ouvrages;
- système de sonorisation des refuges, issues de secours et accès pompiers;
- système de contrôle sanction des vitesses (« radars »);
- système de contrôle sanction des distances entre véhicules;
- système de péage dynamique « freeflow » notamment en milieu urbain.

Ces systèmes complexes et leur mise en application ont suivi et suivent toujours des évolutions au gré des réflexions menées à la fois sur les besoins et sur l'utilisation des dernières technologies de l'information et de la communication.

L'ingénierie doit en particulier considérer :

- les évolutions de la doctrine en matière de sécurité et des dispositions réglementaires résultantes;
- les évolutions technologiques qui sont encore très

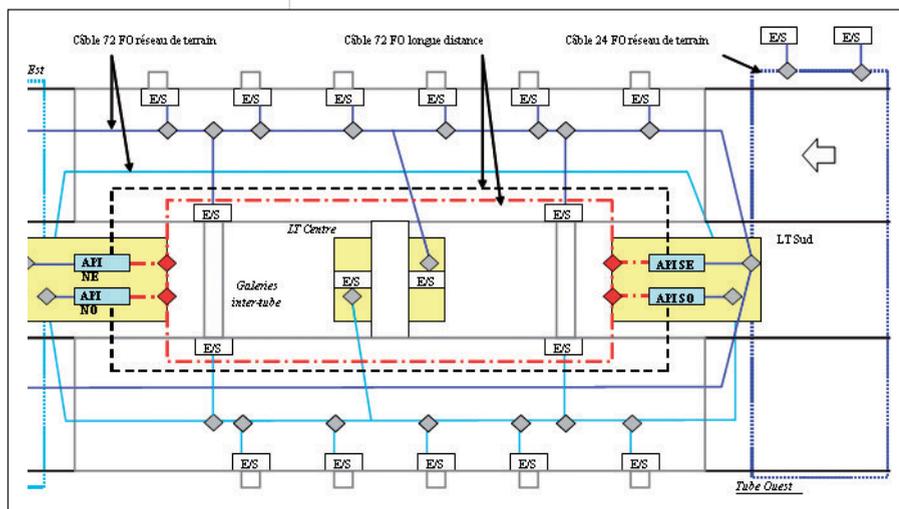


Figure 5

Exemple de schéma d'architecture d'un réseau télécom en tunnel (tunnel du Mont-Sion sur A41)

Typical diagram of a telecom network architecture in a tunnel (Mont-Sion tunnel on A41 motorway)



notables dans les domaines de l'image et des télécommunications;

- l'évolution des besoins pour les moyens d'intervention, leur rapidité et leur efficacité;
- l'évolution des modes d'exploitation qui s'appuient de plus en plus sur les technologies alliant les différents avantages apportés par les solutions d'automatismes, d'informatiques et de télécommunications.

Les retours d'expérience contribuent également de manière fondamentale aux choix qui sont faits, autant au niveau matériel que fonctionnel, vis-à-vis des systèmes mis en place, de leur efficacité, de leur pérennité et de leur aisance à la maintenance.

Les mutations techniques étant rapides et l'obsolescence de certains matériels ou logiciels arrivant de même très rapidement, certaines installations réalisées il y a dix ans, nécessitent déjà une remise à niveau ou une rénovation complète.

La veille auprès des exploitants, le partage des expériences acquises par ceux-ci ainsi que la veille technologique et l'expérimentation sont donc indispensables au processus d'ingénierie.

Par ailleurs, la complexité des systèmes s'accroît avec les dispositions constructives des ouvrages comme cela est notamment le cas pour les tunnels à deux niveaux superposés, pour les tunnels en zone urbaine, avec des échangeurs, pour les tunnels autorisés aux matières dangereuses, etc.

L'augmentation des exigences de sécurité et l'accroissement du nombre et de la complexité des systèmes,

équipements, senseurs, capteurs mis en œuvre conduisent à multiplier le nombre d'informations remontées au PC de surveillance, à accroître le volume de traitement, et à la nécessité de développer des systèmes informatisés d'aide à l'exploitation qui répondent fonctionnellement et en temps réel aux besoins de l'exploitation de la manière la plus efficace et la plus sûre qui soit.

La complexité inhérente à l'ensemble des installations doit donc être « atténuée » du point de vue des exploitants en charge de la surveillance et de la maintenance au travers d'une intégration pertinente de ces systèmes entre eux et d'une intégration pertinente de ces systèmes avec les dispositions constructives du génie civil des ouvrages.

La résultante, pour les exploitants dans les PC de surveillance et sur le terrain, a pour nécessité d'aboutir à la conception d'outils d'aide à l'exploitation comportant notamment des interfaces homme-machine aisées à maîtriser et efficaces, tout particulièrement en cas de crise. L'ingénierie a un rôle majeur dans ce processus d'intégration, tout particulièrement en raison de la diversité des fournisseurs et entreprises en charge de la réalisation des systèmes en question, qui doivent être impérativement coordonnés tout au long du processus de conception, réalisation, essais et mise en service.

En complément, une des préoccupations majeures, qui doit être constamment réfléchiée et contrôlée lors des études d'ingénierie, et par la suite en phase de réalisation, concerne les problématiques de défaillance ou de destruction partielle des systèmes répondant aux besoins de la sécurité. Il n'est pas concevable, en effet, d'investir de façon importante dans ces systèmes si ceux-ci ne sont intrinsèquement pas fiables et/ou nécessitent une maintenance astreignante.

Les opérateurs et personnels en charge de l'exploitation doivent en effet avoir une parfaite confiance en ces systèmes. Dans le cas où de trop nombreuses pannes ou bien de trop nombreuses fausses alarmes surviennent, la confiance n'y est plus et l'outil ne remplit plus son rôle d'assistance à l'exploitation.

Cette problématique est d'autant plus cruciale en cas d'incident ou d'accident en tunnel. Le cas le plus dramatique étant celui de l'incendie où très rapidement les conséquences sont majeures. Il faut que les systèmes aient des temps de réponses très courts (et sans fausse alarme) pour permettre l'alerte des services de secours et déclencher la mise en sécurité de l'ouvrage et des usagers dans les plus brefs délais.

Les dispositions constructives des équipements et systèmes dans l'ouvrage sont ainsi conçues de telle sorte que leur destruction potentielle par un incendie n'impacte pas significativement leur disponibilité et fonctionnalités principales.

L'intégration sécuritaire des installations de télétransmission

Les réseaux de télétransmission permettent de relier entre eux et au PC de surveillance les différents équipements devant communiquer les uns avec les autres, et en temps réel pour la plupart. Cette communication couvre les besoins pour la voix, les données et les images. Les réseaux de télétransmission s'avèrent être au cœur des différents systèmes pour leur fonctionnement courant, et il n'est donc pas envisageable de perdre ce composant essentiel de l'exploitation des ouvrages. Sans réseau, les exploitants ainsi que les services de sécurité et de secours se retrouveraient aujourd'hui plus ou moins totalement sourds, muets, aveugles... et donc inopérants.

Différentes solutions de redondance et de sécurisation des réseaux sont ainsi systématiquement mises en œuvre dans les tunnels et au minimum jusqu'au PC de surveillance. Les dispositions prises relèvent à la fois de la protection des câbles concernés (protection mécanique, protection au feu), du bouclage ou doublage des réseaux par des chemins distincts (câblés ou radios), de la redondance des « équipements actifs », des possibilités de basculement automatique sur d'autres réseaux, du sectionnement des réseaux (notamment radio) en cellules séparées pouvant se secourir mutuellement, etc. (figure 5).

L'intégration, au sein du génie civil, des chambres de jonction et de tirage

Au sein d'un tunnel, les chambres de jonction et de tirage sont des points singuliers qui nécessitent de nombreux échanges entre l'ingénierie du génie civil et celle dite des « équipements ». En effet, ces petits ouvrages sont souvent assez complexes à imaginer dans la mesure où ils sont à la croisée de nombreux réseaux, souvent bien incompatibles les uns avec les autres (assainissement, exhaure, réseau d'eau incendie, réseau électrique haute tension, réseau électrique basse tension, réseau électrique à courants faibles et fibres optiques).

D'autre part, leur volume vient directement impacter les dispositions constructives du tunnel au droit des niches de sécurité, des accès à des galeries, refuges, locaux techniques, etc., ceci avec des connexions d'échange via des fourreaux, caniveaux, gaines qui se croisent.

Ces chambres peuvent, en outre, être disposées sous chaussée ou sous BAU ce qui impose une structure lourde et une fermeture complexe, dans des localisations souvent très contraintes (photo 2).



Photo 2

Coulage du béton d'une multitubulaire (chantier de rénovation des tunnels du contournement de Nice sur A8)

Pouring concrete for a multitube system (project for renovation of Nice bypass tunnels on A8 motorway)



Photo 3

PC italien du tunnel du Fréjus
Italian control centre for the Fréjus tunnel

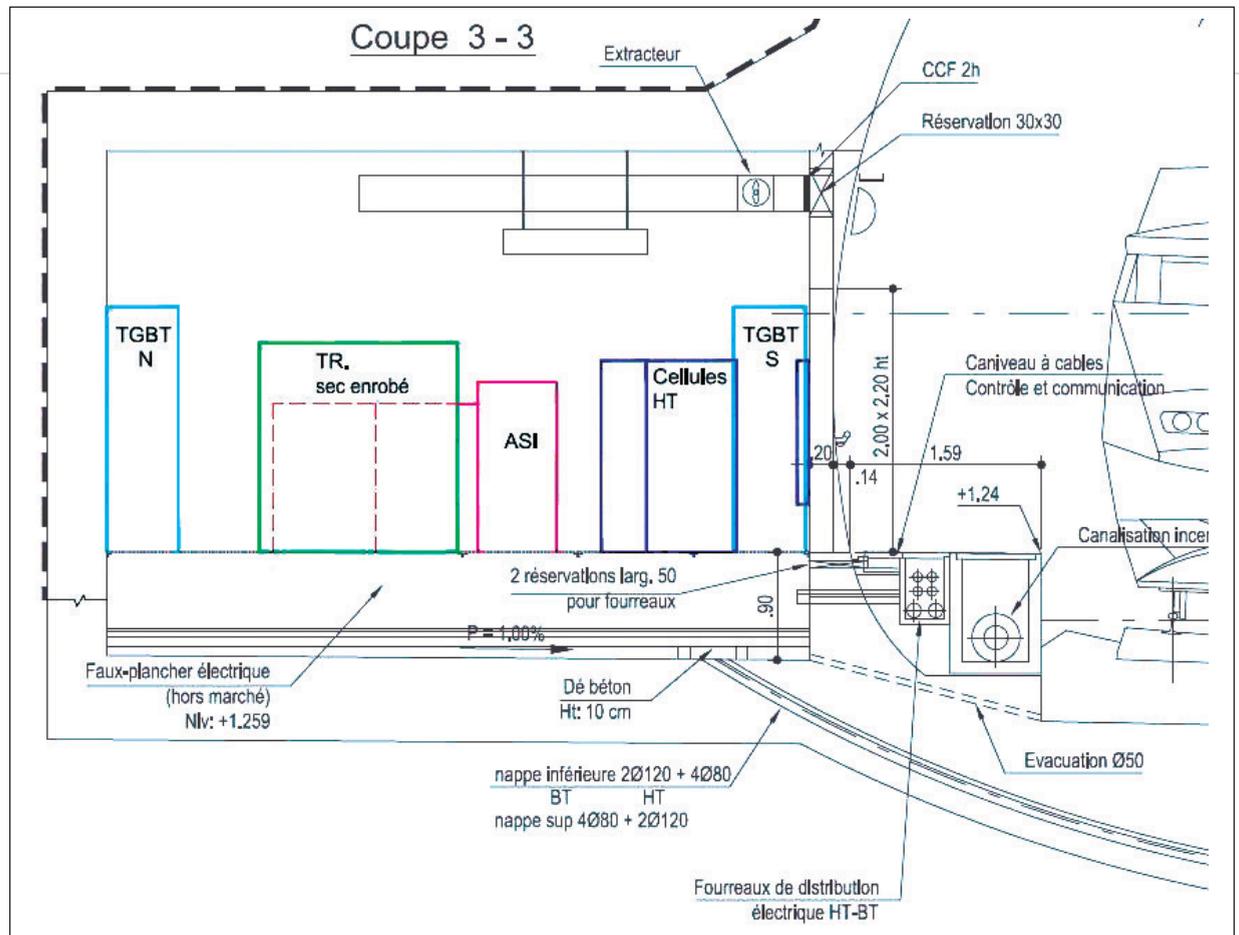
L'intégration des systèmes entre eux

Dans le cas d'ouvrages souterrains complexes et notamment en zone urbaine, le nombre de systèmes mis en place et imbriqués devient très conséquent et difficilement exploitable correctement.

Leur intégration les uns avec les autres est fondamentale et doit répondre aux politiques d'exploitation mises en œuvre. En particulier, la conception du PC de surveillance ne doit pas aboutir à une juxtaposition d'outils voix – données – images déraisonnable que les opérateurs ne sauraient utiliser dans les meilleures conditions notamment en cas de crise.

Cette problématique est traitée au travers des études d'ergonomie du PC et par la mise en œuvre d'un SAE informatisé dont la conception, parfois très longue au niveau fonctionnel et au niveau du développement informatique, a pour vocation d'assister les opérateurs dans tous leurs besoins et en particulier ceux liés à la sécurité (photo 3).

Figure 6
Exemple d'interfaces
entre un local technique
et un tunnel ferroviaire
*Example of interfaces between
a plant room and a rail tunnel*



L'intégration sécuritaire des installations d'énergie

Sur les tunnels d'une certaine longueur, le réseau d'alimentation électrique s'articule autour de postes haute tension interconnectés entre eux par des câbles en haute tension cheminant de locaux techniques en locaux techniques et vers le distributeur (RTE/EDF par exemple).

Les postes eux-mêmes sont fréquemment conçus pour être redondants avec séparation physique et protection au feu des deux entités qui se secourent l'une l'autre, ce qui conduit à avoir des locaux distincts et potentiellement non détruits simultanément en cas d'incendie. Il est habituel, dans le cas où il y a deux espaces trafic (un tube par sens), de séparer les réseaux d'alimentation en énergie de chaque espace trafic et d'assurer la redondance de l'un par l'autre.

Les câbles d'interconnexion des postes (fréquemment en 20000 V) sont disposés dans des galeries techniques, des gaines, des fourreaux, des caniveaux ou des espaces spécifiques hors d'atteinte. Le risque de destruction des câbles est évalué sur tout leur parcours afin de le limiter au mieux et d'assurer ainsi les dispositions de redondance avec des cheminements séparés normalement non impactés simultanément.

D'une manière générale et pour la majorité des câbles

d'alimentation électrique (en haute et basse tension), il est prévu des parcours avec protection mécanique et protection au feu du cheminement ou résistance au feu du câble intrinsèquement, tout en maintenant une accessibilité suffisante pour les besoins de maintenance, ce qui ne va pas sans difficultés notamment au niveau des chambres de tirage.

■ Cas des tunnels ferroviaires

Dans les tunnels ferroviaires, on ne retrouve pas les systèmes propres aux flux de circulation routiers, mais bien évidemment des systèmes propres aux flux de circulation des trains.

Les préoccupations sécuritaires dans les tunnels ferroviaires sont analogues à celles des tunnels routiers mais sont néanmoins très fortement axées sur la signalisation ferroviaire et les risques d'incendie.

Les systèmes (originaux par rapport au domaine routier) mis en place sont les suivants :

- la signalisation ferroviaire qui évite toute éventualité de rattrapage d'un train par un autre;
- la communication radio sol-train (à terme supportée par le GSM-R) qui permet la liaison entre conducteur et régulateur au PC;
- les systèmes automatiques de détection de boîtes

chaudes qui permettent de mesurer la température des boîtes d'essieux des matériels roulants, d'en apprécier les évolutions au fil des détecteurs passés et de délivrer des alarmes si un seuil critique est atteint;

- les éventuels systèmes de détection de chaleur, fumée, flamme, ponctuels ou linéaires et plus ou moins combinés pour notamment pallier les perturbations liées au rayonnement généré par le contact pantographe/caténaire;
- les éventuels systèmes de détection de gaz explosifs/toxiques;
- les éventuels systèmes de détection de déraillement;
- les éventuels portiques thermographiques de détection de points anormalement chauds sur les matériels roulants et leur chargement;
- les éventuels systèmes de contrôle de gabarit pour les tunnels situés sur un itinéraire type autoroute ferroviaire;
- pour les tunnels longs : des ouvrages particuliers intimement liés à l'exploitation ferroviaire telles que voies d'évitement ou cross-over.

Par ailleurs, certains matériels roulants modernes (TGV) sont équipés de dispositifs embarqués de détection des échauffements anormaux de leurs équipements de traction et haute tension.

Enfin, le nombre de trains simultanément dans un même tunnel est souvent contrôlé et limité volontairement (figure 6). ■

ABSTRACT Complex systems engineering in tunnels

Fr. Hervé, A. Griveaux

For some years now, sophisticated research and functional analyses have been performed on tunnels for the implementation of complex systems, with a constant objective of trying to improve comfort and safety levels.

Certain dramatic events such as the fire in the Mont-Blanc tunnel accelerated the process, but the approach had already been adopted.

This article describes the main features of the practical approach to modern tunnel safety and systems and equipment engineering.

A more detailed analysis is presented of systems that are especially important for comfort and safety issues : ventilation from the viewpoint of computer-assisted design tools, and information and communication technologies for improved operation and safety.

RESUMEN ESPAÑOL La ingeniería de los sistemas complejos en los túneles

Fr. Hervé y A. Griveaux

Desde hace ya algunos años, los túneles son objeto de estudios y análisis funcionales elaborados que conducen en la implementación de los sistemas complejos, y ello según un objetivo constante de búsqueda de mejora del nivel de confort y de seguridad.

Algunos acontecimientos dramáticos como por ejemplo el incendio en el túnel del Mont-Blanc, vinieron a acelerar el proceso, pero el planteamiento ya había dado comienzo.

En el presente artículo se describen compendiadamente el modelo práctico de la ingeniería moderna de la seguridad y de los sistemas y equipamientos de los túneles.

Se presenta un análisis más exhaustivo acerca de sistemas particularmente importantes desde el punto de vista de los retos de confort y de seguridad : la ventilación en cuanto a las herramientas de cálculos de ayuda para el establecimiento del concepto por una parte y las tecnologías de la información y de la comunicación al servicio de la explotación y de la seguridad por otra parte.

Travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire à Sainte-Marie-aux-Mines (68)

André Thiboud
 Conducteur d'opérations.
 Direction de la construction et des grands investissements
 Autoroutes Paris Rhin Rhône

Hubert Tournery
 Directeur de projets
 Scetauroute

André Duteil
 Directeur de chantier
 Groupement Bouygues TP et Eiffage TP

Ce tunnel routier de près de 7 km de longueur a fait l'objet d'un important programme de sécurisation (200 M€ sur un peu plus de trois ans). Les auteurs décrivent les travaux de dépose, transport et recyclage des 1374 caissons de ventilation en béton armé préfabriqué. En effet, comme ce système ne répondait plus à la nouvelle réglementation incendie d'août 2000, il a été remplacé par une nouvelle galerie de sécurité parallèle au tunnel depuis le 15 août 2007. L'objectif de mise en service est fixé au 1^{er} octobre 2008.

Le programme de sécurisation de cet ouvrage comprenait pour l'essentiel :

- la construction d'une galerie de sécurité parallèle au tunnel existant qui a été creusée :
 - > au tunnelier sur 6220 m,
 - > à l'explosif sur : 330 m côté Haut-Rhin et 400 m côté Vosges (figure 2);
- la réalisation de salles de transit pressurisées tous les 400 m (photo 1);

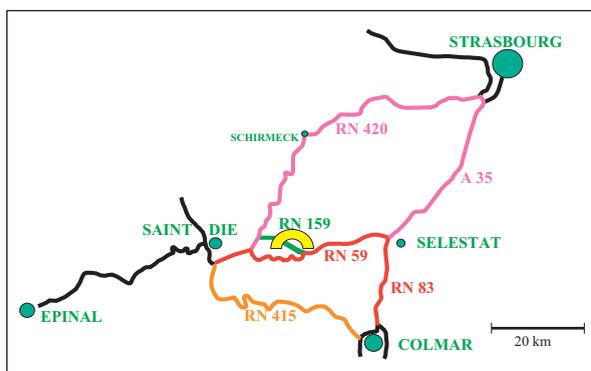


Figure 1
 Localisation du tunnel Maurice Lemaire
 Location of the Maurice Lemaire tunnel

■ Préambule

Reliant les communes de Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin) et Lusse (Vosges) par la route nationale 159, le tunnel Maurice Lemaire est le plus long tunnel routier entièrement situé sur le sol français (6950 m) – (figure 1).



Photo 1
 Creusement et bétonnage des seize abris et des cinq sous-stations électriques
 Excavation and concreting of the 16 shelters and 5 electric sub-stations

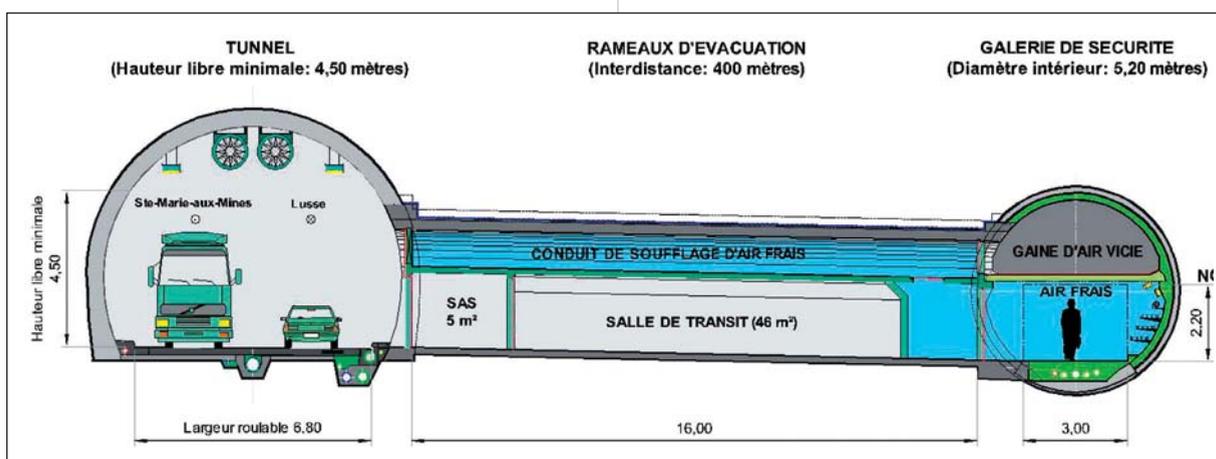


Figure 2
 Coupes transversales du tunnel
 Cross sections of the tunnel

Travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire à Sainte-Marie-aux-Mines (68)

Figure 3

Les équipements et la signalisation
Appurtenances and signage



A
V
A
N
T



A
P
R
È
S

Photo 2

Le tunnel avant et après travaux de sécurisation

The tunnel before and after the safety improvement work



- la modernisation et la sécurisation des équipements et de la signalisation (figure 3);
- la reprise de l'assainissement et des chaussées.

Ces travaux avaient pour effet d'améliorer la ventilation, les capacités de désenfumage et de renforcer la tenue au feu du tunnel.

Ces travaux représentent un investissement de 200 millions d'euros HT valeur 2002 (y compris aménagements extérieurs). Le financement est assuré par la société Autoroutes Paris Rhin Rhône à hauteur de 165 millions d'euros HT et par les collectivités territoriales et l'État pour 35 millions d'euros HT.

Les travaux de génie civil ont débuté le 20 avril 2004 et ont duré 40 mois (jusqu'au 15 août 2007 après une période de préparation de 3 mois ayant débuté le 20 janvier 2004).

Le programme de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire prévoyait outre la réalisation d'une galerie latérale de ventilation et d'évacuation, la rénovation du tunnel existant (photo 2) qui consista principalement :

- au démontage et à l'évacuation de l'ensemble des équipements d'exploitation existants;
- à l'enlèvement des 1374 caissons de ventilation du tunnel, soit près de 30000 t de béton armé et au confortement de la voûte découverte;
- à la création d'un caniveau à pente continue permettant l'absorption rapide des liquides déversés sur la chaussée;
- à la mise en œuvre de nouveaux équipements d'exploitation et de sécurité.

■ Caractéristiques des caissons de ventilation

Les caissons de ventilation ont été mis en place dans l'ouvrage, au cours des années 70, lors de sa transformation de tunnel ferroviaire en tunnel routier.

Réalisés en béton préfabriqué (voussoirs de 5 m de longueur et 7 m de largeur), ils constituaient des conduits reliés aux usines de ventilation situées aux têtes de l'ouvrage. Ils permettaient ainsi l'injection d'air frais tout au long de l'ouvrage ainsi que le désenfumage en cas d'incendie (les performances du système de ventilation étaient insuffisantes au regard de la nouvelle réglementation d'août 2000).

Chaque caisson, d'un poids unitaire de 20 t, était tenu par deux systèmes indépendants (figure 4) :

- aux quatre coins de celui-ci, quatre ancrages scellés dans le terrain suspendaient le caisson en voûte du tunnel;
- trois butons en acier, scellés dans le revêtement du

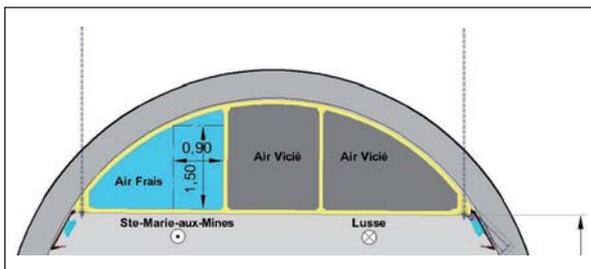


Figure 4

Dispositif de tenue des caissons de ventilation
Ventilation chamber holding device

tunnel, soutenaient le caisson au cas où un ancrage lâcherait (ce second système avait été ajouté suite à la chute d'un caisson).

■ Un enlèvement nécessaire

(photo 3)

Les caissons de ventilation existants posaient différents problèmes :

- une résistance au feu très insuffisante (10 minutes pour incendie de PL) nécessitant la mise en œuvre d'une protection thermique et présence d'étanchéité bitumineuse très inflammable en surface de certains caissons (bituthène en extradados);
- dans l'hypothèse d'une protection thermique des caissons, des dimensions largement insuffisantes pour être utilisés en tant que chemin d'évacuation pour les usagers en cas d'incendie;
- une limitation du gabarit (4,17 m) ne permettant pas de respecter la réglementation des routes nationales;
- une impossibilité de mettre en place une signalisation en plafond par manque d'espace en voûte;
- des difficultés pour inspecter et entretenir l'état du revêtement original du tunnel (datant des années trente).

La solution de sécurisation retenue au cours des études menées en 2001-2002, après des études comparatives des différentes alternatives possibles, consiste en la création d'une galerie latérale de sécurité permettant l'évacuation des usagers, mais assurant également par ailleurs trois autres fonctions principales :

- l'aspiration des fumées en cas d'incendie et l'aspiration d'air vicié en cas de fort trafic;
- l'amenée d'air frais;
- la sécurisation des divers réseaux (électricité, communication et défense incendie).



Photo 3

Vue des caissons de ventilation existants
View of the existing ventilation chambers

L'utilisation de la galerie latérale pour la ventilation vise à optimiser l'investissement consenti, et permet en outre de déposer les caissons de ventilation du tunnel et donc de libérer l'espace en voûte.

Cette disposition procurait alors les possibilités et avantages suivants :

- mise en œuvre d'accélérateurs permettant la maîtrise rapide des courants d'air longitudinaux en cas d'incendie, condition nécessaire pour favoriser la stratification des fumées;
- mise en place, en voûte, d'une signalisation plus efficace (panneaux à message variable, etc.) mais également d'une surveillance vidéo plus efficace (détection automatique d'incident);
- possibilité de confortement et de drainage de la voûte du tunnel;
- mise au gabarit réglementaire sans abaissement de la chaussée actuelle;
- suppression définitive des risques liés à la tenue au feu des caissons de ventilation.

■ Une application concrète du développement durable

Lors des études d'impact menées dans le cadre de la déclaration d'utilité publique de la sécurisation du tunnel, Autoroutes Paris Rhin Rhône a décidé avec son maître d'œuvre le groupement BG - Scetauroute, d'appliquer sa démarche de développement durable dans le projet : en plus de la réutilisation des matériaux d'excavation de la galerie latérale (200000 m³), et après en avoir vérifié la faisabilité, il a été imposé dans le cahier des charges de la consultation des travaux de génie civil, l'obligation de recycler les quelque 30000 t de béton armé constituées par les caissons.

Le groupement d'entreprises Bouygues TP - Eiffage TP, retenu pour les travaux, a proposé un processus complet visant à respecter cette démarche.

Travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire à Sainte-Marie-aux-Mines (68)

Photo 4

Portique automoteur et ses deux plateformes latérales
Self-propelled gantry crane and its two side platforms



Photo 5

Découpage des suspentes et des butons latéraux
Cutting out the suspenders and side stays



Photo 6

Tracteur et remorque porte-char du véhicule de transfert
Tractor and low loader trailer of the transfer vehicle



■ Mise en place préparatoire

Pour pouvoir réaliser le démontage des 1374 caissons en place dans le tunnel dans les délais impartis, le groupement d'entreprises Bouygues TP - Eiffage TP a, dès la notification du marché, mis en place une cellule de préparation sur le chantier pour :

- trouver un terrain pour stocker, nettoyer, démanteler les caissons et stocker les matériaux avant réemploi ;
- viabiliser et sécuriser le terrain ;
- mettre en place une unité de nettoyage et de traitement ;
- définir, construire et tester un outil pour la dépose des éléments ;
- mettre au point des unités de transport et obtenir les autorisations nécessaires pour les convois.

Le premier caisson a été déposé le 9 juillet 2004, dans le tunnel préalablement fermé et vidé de ses équipements d'exploitation. La dépose du dernier caisson a eu lieu le 2 décembre 2004.

Les opérations de nettoyage et de concassage étaient terminées fin mars 2005 et une partie des matériaux avait, à cette date, déjà été effectivement recyclée.

■ Démontage et transfert par portique automoteur (photo 4)

L'outil spécifique construit pour cette opération est un portique automoteur avec deux plateformes latérales dont les mouvements verticaux sont obtenus grâce à des vérins.

Le portique est conduit en position et les plateformes sont relevées au contact du caisson.

Des asservissements permettent de relever très légèrement le caisson et donc de décharger les systèmes de suspension.

Les suspentes (au nombre de quatre par caisson) et les butons latéraux (trois par caisson) sont alors découpés au chalumeau (photo 5). Une unité d'aspiration permet si nécessaire d'enlever immédiatement les poussières non adhérentes sur la partie supérieure du caisson.

Une fois cette opération terminée, le véhicule de transfert se met en position (photo 6). Il est constitué d'un tracteur et d'une remorque porte-char sur laquelle un ensemble a été conçu et fabriqué pour :

- reprendre le caisson de 7 m de large et le positionner ;
- dès que possible (au droit d'un garage ou d'une niche de grande dimension), le faire pivoter pour réduire à 5 m l'encombrement du convoi.

La remorque chargée (photo 7), le convoi sort du tunnel, côté Alsace et va jusqu'à la zone de stockage et de traitement, par un itinéraire aménagé et balisé

Photo 8

Transport des caissons depuis la sortie du tunnel côté Alsace

Transport of the chambers from the tunnel exit on the Alsace side



(peinture, plots séparateurs, feux tricolores) afin que le transport soit sécurisé et la gêne aux riverains minimisée (photo 8).

Les travaux ont été sous-traités par le groupement Bouygues TP - Eiffage TP à l'entreprise Bari (Sainte-Marie-aux-Mines).

■ Aire de traitement (photo 9)

L'aire de stockage est étanche afin de récupérer les eaux de pluie qui peuvent être polluées par les caissons non traités.

Un hangar a été construit pour abriter :

- la chaîne de lavage haute pression des caissons;
- l'unité de traitement-dépollution des eaux de lavage;
- l'unité de traitement des éléments métalliques.

Une autre partie de la zone a également été traitée pour recevoir les caissons nettoyés.

Trois autres zones ont été définies pour :

- prédécouper les caissons;
- concasser les caissons;
- stocker avant réemploi les matériaux concassés.

L'ensemble de cette aire est clôturé et assaini. Les diverses manutentions sont réalisées par des stackers spécialement adaptés. La logistique et l'organisation de la plate-forme sont assurées par le groupement Bouygues TP - Eiffage TP.

■ Nettoyage des caissons (photo 10)

Les caissons en provenance du tunnel présentent des dépôts de poussières, principalement sur leur face supérieure, suite au passage des véhicules durant trente ans. Ils doivent donc être nettoyés avant leur recyclage.

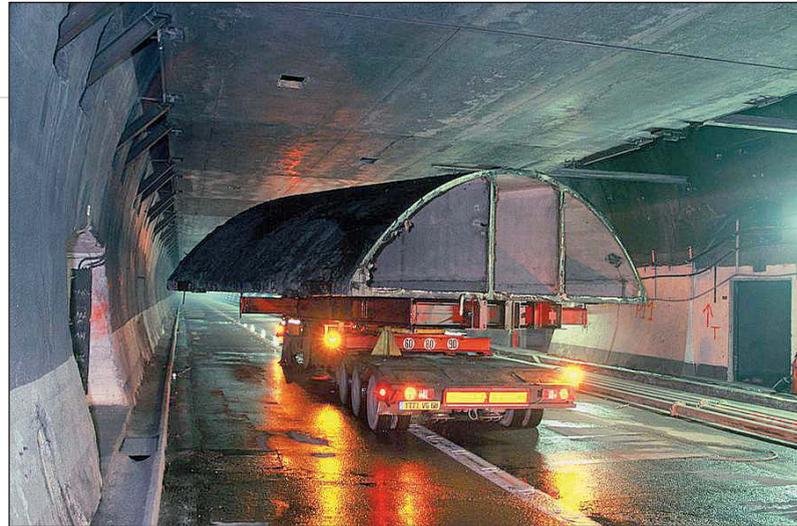


Photo 7

Pivotage du caisson chargé sur sa remorque

Swivelling of the chamber loaded on its trailer



Photo 9

Aire de traitement

Treatment area



Photo 10

Transport des caissons

par le stacker

Chamber transport

by stacker



Travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire à Sainte-Marie-aux-Mines (68)

Photo 12

Portique de lavage pour le nettoyage de l'extrados du caisson

Washing portal for cleaning the upper surface of the chamber



Photo 13

Suivi en laboratoire de la qualité des caissons

Laboratory monitoring of chamber quality



► Chaque caisson possède une fiche de suivi, permettant de valider le nettoyage des caissons et les réceptionner en vue de morcellement à l'issue du nettoyage complet.

Ils sont repris par le stacker et déposés au début de la chaîne de traitement, dans la zone de chargement. Le traitement peut débuter :

- le nettoyage intérieur des caissons se fait manuellement par deux techniciens et à l'aide de nettoyeurs haute pression (photo 11); ces deux techniciens ont également la charge d'ôter les joints d'étanchéité et,



Photo 11

Nettoyage intérieur des caissons
Cleaning the inside of the chambers

si besoin est, les pièces de métallerie. Ces pièces de métallerie, ainsi que celles issues du tunnel sont également traitées;

- le caisson chargé avance sur la chaîne de transport, celle-ci va l'amener jusqu'au portique de lavage de l'extrados (extérieur) du caisson; il est constitué d'un arc se déplaçant et possédant des jets d'eaux alimentés par un nettoyeur haute pression (photo 11). La vitesse d'avancement du caisson sur la chaîne est de 1 m par minute.

Le chargement d'un autre caisson est alors possible; la chaîne de progression permet de charger jusqu'à cinq caissons simultanément.

Le déchargement s'effectue en fin de chaîne au moyen du stacker. La fiche de suivi des caissons est alors rendue au chef de plate-forme, lorsque le caisson sort du hangar.

L'ensemble de ce nettoyage se déroule dans le hangar de 60 m de long se situant sur la plate-forme de stockage dite plate-forme « Léonhart ».

Les travaux sont réalisés par l'entreprise Belfor en sous-traitance du groupement Bouygues TP - Eiffage TP.

Le suivi de la qualité des caissons en tant que déchets inertes est réalisé par le laboratoire de terrain, à travers un test de lixiviation bihebdomadaire.

■ Traitement des eaux de nettoyage (photo 12)

L'ensemble des eaux de lavage des caissons est récupéré et ces eaux sont traitées au sein du hangar, dans la station de traitement des eaux Belfor.

Tout d'abord un traitement physico-chimique a lieu : l'ajout de coagulant et de flocculant (provoquant la précipitation des flocons) permet d'éliminer une partie de



Photo 14

Traitement physico-chimique des eaux de lavage des caissons

Physico-chemical treatment of chamber washing water

la matière en suspension. Les boues ainsi formées sont récupérées et envoyées dans un centre agréé pour le traitement et l'élimination des déchets (CET de classe I) (photo 13).

L'eau subit ensuite des filtrations successives qui permettent d'épurer un maximum des matières en suspension (photo 14).

L'eau claire en sortie de station doit répondre principalement à des critères d'utilisation pour les nettoyeurs haute pression, des tests sont effectués quotidiennement pour s'assurer de leur qualité. Il n'y a donc pas de rejets d'eaux de lavage, et l'ensemble de l'usine tourne en circuit fermé (photo 15).

■ Recyclage des caissons (photo 16)

Les éléments nettoyés sont récupérés de la zone de stockage par les stackers et mis en disposition sur une aire spécifique de l'entreprise Bari, qui assure le morcellement à l'aide de pelles équipées de brise-roche hydraulique.

Ils sont morcelés en éléments de moins de 80 cm. Ces morceaux sont repris par l'entreprise Léonhart pour être concassés, à l'aide d'un concasseur (Klermann) alimenté par une pelle (Cat 322) et équipé d'un tapis à électroaimant permettant la séparation des éléments métalliques et du béton.

Les matériaux sont ensuite repris par chargeur (Cat 338) pour être partiellement déposés, provisoirement, en cordon sur une hauteur de 6 m afin d'assurer une protection phonique des riverains. Le reste des matériaux est stocké sur site en attente d'un réemploi ultérieur.

Tous les matériaux (métal, béton, etc.) font l'objet d'une fiche de suivi jusqu'à leur valorisation. Les pro-



Photo 15

Filtrations successives permettant d'épurer un maximum de matières en suspension

Series of filtering operations to purify a maximum of suspended solids

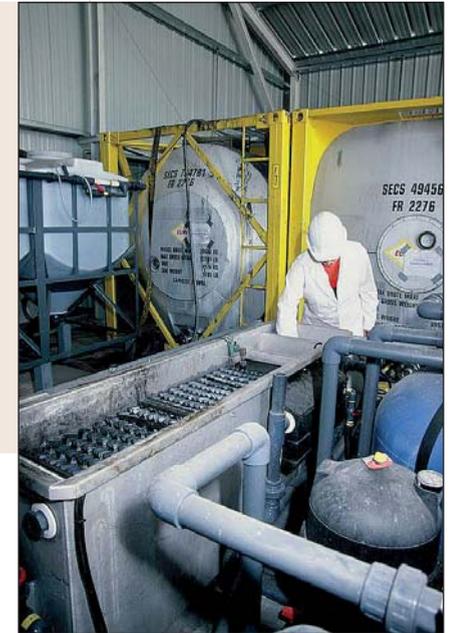


Photo 16

Concassage des éléments de caisson

Crushing of chamber elements

Travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire à Sainte-Marie-aux-Mines (68)



Photo 17

Le tunnel prêt pour les travaux de sécurisation et libéré des caissons

The tunnel ready for the safety improvement works and cleared of the chambers

► duits qui ne peuvent être valorisés sont dirigés vers des centres de traitement spécialisés.

L'ensemble de la chaîne de traitement a été conçu et réalisé pour assurer un respect de l'environnement et une valorisation maximale des matériaux dans une démarche de développement durable conformément au souhait des Autoroutes Paris Rhin Rhône. ■

Nota : Cet article est paru dans le n° 188 de mars-avril 2005 de la revue *Tunnels et Ouvrages souterrains*.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitrise d'ouvrage

Direction de la construction et des grands investissements (DIC) des Autoroutes Paris Rhin Rhône

Maitrise d'œuvre

Groupement Bonnard & Gardel et Scetauroute

Travaux de génie civil

Groupement Bouygues TP et Eiffage TP

ABSTRACT

Work to improve the safety of the Maurice Lemaire tunnel in Sainte-Marie-aux-Mines

A. Thiboud, H. Tournery, A. Duteil

This road tunnel nearly 7 km long has undergone a major safety improvement programme (at a cost of 200 m euros over slightly more than three years). The authors describe the operations of removal, transport and recycling of the 1374 ventilation chambers made of prefabricated reinforced concrete. This system no longer complied with the new fire regulations of August 2000, and has been replaced by a new emergency gallery parallel to the tunnel since 15 August 2007.

The scheduled date of commissioning is 1st October 2008.

RESUMEN ESPAÑOL

Trabajos de puesta en protección del túnel Maurice Lemaire en Sainte-Marie-aux-Mines (68)

A. Thiboud, H. Tournery y A. Duteil

Este túnel viario de casi 7 kilómetros de longitud ha sido objeto de un importante programa de protección (200 millones de euros en un plazo de más de 3 años). Los autores describen los trabajos de desmontaje, transporte y reciclado de los 1374 cajones de ventilación de hormigón armado prefabricado. Efectivamente, ya que este sistema no correspondía a la nueva normativa incendio de agosto 2000, fue sustituida por una nueva galería de seguridad paralela al túnel desde el 15 de agosto de 2007.

El objetivo de puesta en servicio se ha fijado al 1 de octubre de 2008.

La ligne 4 fait route vers Montrouge

Jean-Claude Durand
 Directeur de chantier
 Razel

Olivier Dufourd
 Responsable
 des travaux
 Maître d'œuvre XELIS

Ce projet délicat, en site urbain ultra-confiné, permettra de prolonger la ligne 4 du métropolitain jusqu'au cœur de Montrouge. Quatre années de travaux seront nécessaires pour réaliser le tunnel de 1470 m de long ainsi que la future station Mairie de Montrouge. Le lot numéro 2, qui représente à lui seul 800 m de creusement nécessite, outre un important travail de préparation des emprises, une délicate campagne de confortement des terrains eu égard à la présence d'anciennes carrières souterraines non visitables. Le planning serré implique de démarrer six chantiers en simultané, les travaux de percement étant exécutés en traditionnel.

En 2012, la très parisienne ligne 4 deviendra francilienne via ce projet de prolongement qui mettra les Montrougiens à 2 minutes de Paris et la porte de Clignancourt à 30 minutes. Les travaux sont séparés en deux lots distincts – les 647 m du lot 1, qui seront en partie exécutés selon la technique de « prédécoupage », permettront le passage sous le périphérique – notre marché de 36,2 millions d'euros comprenant le percement de 700 m du tunnel (section intérieure finie 7,40 m) ainsi que la construction de la future station Mairie de Montrouge.

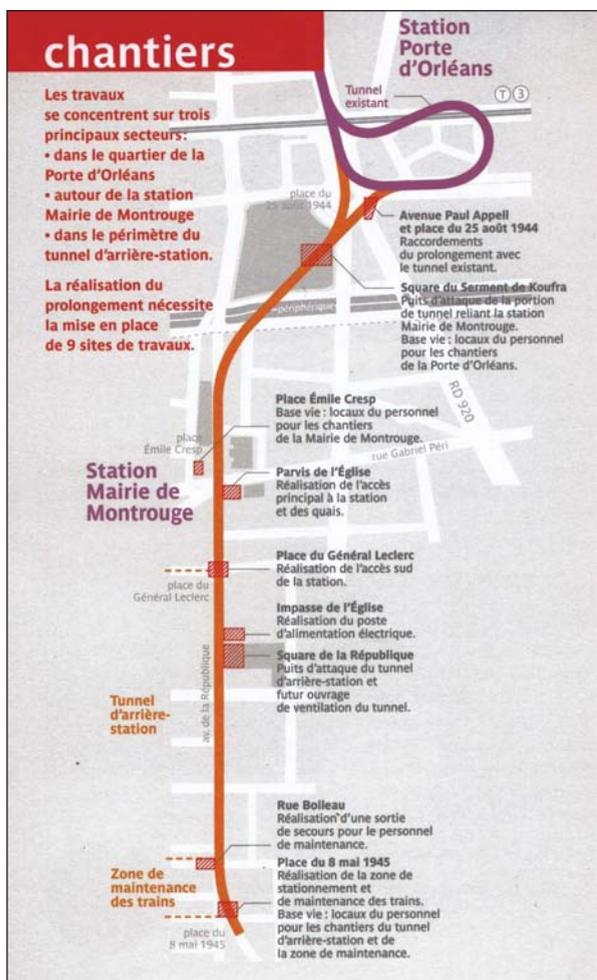
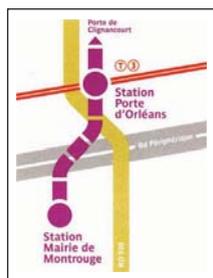


Photo 1
 Le chantier, qui s'inscrit dans un milieu urbain particulièrement dense, comportera jusqu'à six zones de travaux en simultanée. *The project, which is carried out in an extremely dense urban environment, will entail up to six simultaneous work areas.*



Photo 2
 L'accès principal de la station, qui se situe à hauteur du Parvis de l'église Saint-Jacques, nécessite la construction d'une dalle de 660 m². *The main access to the station, located at the level of the Saint-Jacques Church square, requires the construction of a 660 sq. m slab.*

Principale difficulté : un tissu urbain particulièrement dense interdisant, entre autres, les postes de nuit. Nous travaillons depuis plusieurs mois sur les réseaux des différents concessionnaires, avec tous les problèmes d'emprises à négocier, l'objectif étant d'insérer le chantier dans un milieu urbain qui doit continuer à vivre et exister. Il faudrait d'ailleurs plutôt parler de chantiers, puisque nous ouvrirons jusqu'à six zones de travaux en simultané.

La ligne 4 fait route vers Montrouge

Photos 3 et 4

Les terrassements de la dalle s'effectueront en taube, à l'abri d'une berlinoise descendue à 20 m de profondeur

Slab earthworks will be performed by mole, sheltered by a Berlin-type retaining wall taken down to a depth of 20 m



Photo 5

Les puits d'accès aux anciennes carrières non visitables sont creusés en traditionnel par l'intermédiaire de grues de puisatier

The access shafts to the old non man-entry quarries are dug traditionally using well digger's cranes



■ Berlinoise de 20 m de profondeur

La station, qui constitue en quelque sorte la partie noble du lot 2, nécessite à elle seule deux attaques distinctes. Une au sud, au niveau du futur accès de la place du Général Leclerc – le monument aux morts a été déplacé et l'emprise évoluera en fonction de l'avancement – et une au nord, à hauteur du parvis de l'église Saint-Jacques le Majeur où sera implanté l'accès principal aux quais, la salle des billets ainsi que la plupart des locaux techniques. Un troisième accès, place Émile Cresp sera réalisé ultérieurement, une fois la démolition de deux immeubles terminée.

La station, qui se présente sous la forme d'un tunnel voûté de 100 m de longueur (ouverture 13,50 m) sera donc exécutée totalement en souterrain, à partir des deux attaques susmentionnées.

Les travaux, au niveau de l'accès principal, nécessitent la réalisation d'une dalle de 660 m² (22,00 x 30,00 m) sur laquelle seront transférées, eu égard au déficit d'emprise chronique, les installations de chantier. Cette structure de 80 cm d'épaisseur sera coulée sous protection d'une paroi berlinoise périphérique permettant de décaisser jusqu'à 1,50 m de profondeur, afin de parvenir en sous-face de la dalle. Les terrassements se poursuivront en taube, à l'abri d'une seconde berlinoise (HEB 300 tous les 1,50 m) descendue à 20 m de profondeur, fichée dans le calcaire.

Cet ouvrage, qui autorisera la mise en place d'un blindage à l'avancement au fur et à mesure de la descente de la fouille, est complété par la mise en œuvre de

(Suite page 52)

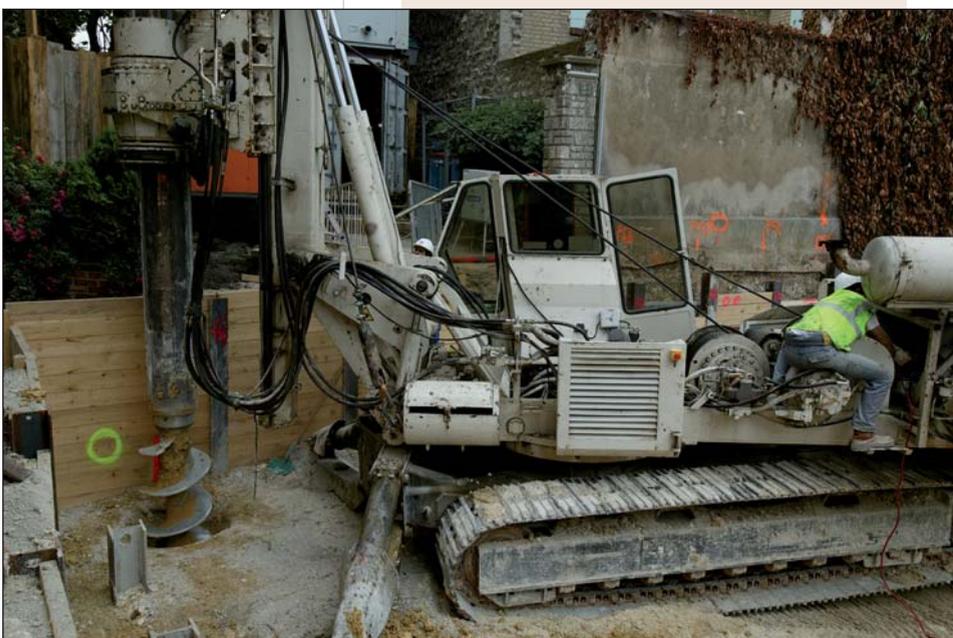




Photo 6

Chaque zone de carrière dégagée est ensuite comblée au moyen de béton coulé depuis la surface

Each quarry area cleared is then filled with concrete poured from the surface

Ligne 4 mode d'emploi

Mise en service entre 1908 et 1910 la ligne 4, qui dessert dix arrondissements parisiens à travers 26 stations, n'avait guère changé depuis un siècle d'exploitation. Sur son trajet nord-sud de 10 km, elle rencontre l'ensemble des autres lignes du métro et du RER.

La ligne 4 circulera jusqu'à Mairie de Montrouge selon les caractéristiques de service actuels, à savoir tous les jours entre 5h30 et 0h45, jusqu'à 2h15 les vendredis, samedis et veilles de fêtes, à une vitesse maximale de 70 km/h et à raison d'un passage de rame toutes les 105 secondes en période de pointe.

Les Montrougiens pourront ainsi rallier directement le centre de Paris en 25 minutes ou se rendre au stade de France en 35 minutes, les chineurs pouvant quant à eux chercher la perle rare en flânant aux Puces de Clignancourt après une demi-heure de trajet.

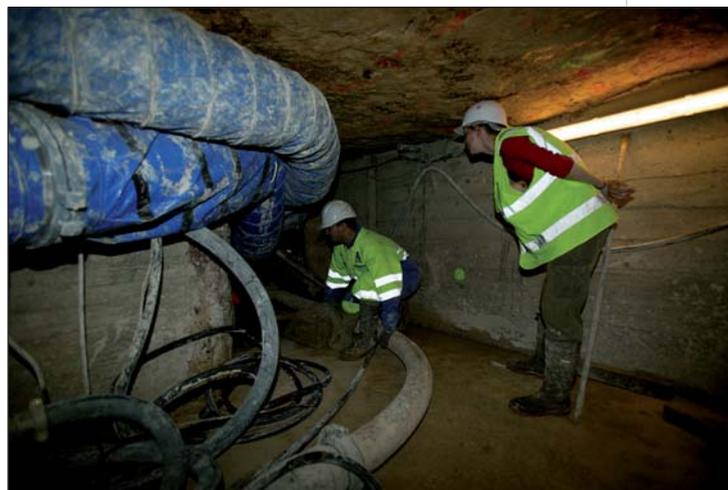


Photo 7

Une des difficultés principales réside dans la présence d'anciennes carrières exploitées sur une hauteur de 1,50 à 2,00 m

One of the main difficulties lies in the presence of old quarries worked over a height of 1.50 to 2.00 m



Photo 8

Les interventions de renforcement s'effectuent par plots afin de ne pas déstabiliser la carrière

Strengthening operations are performed by sections in order not to destabilise the quarry

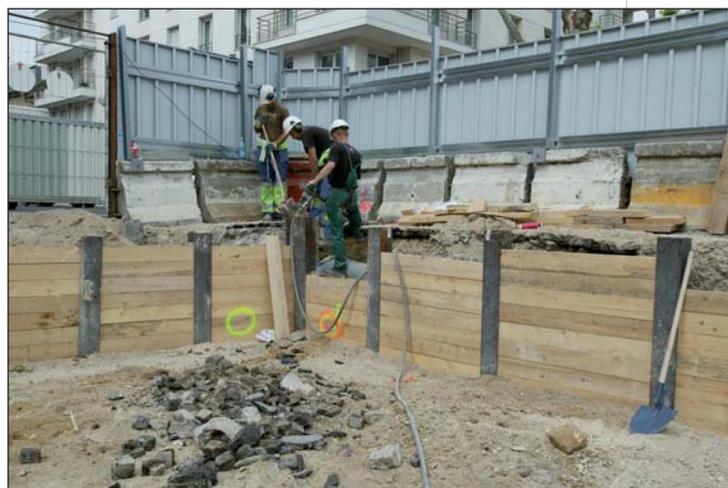


Photo 9

La dalle de 80 cm d'épaisseur sera coulée à l'abri d'une paroi berlinoise périphérique permettant de décaisser jusqu'à 1,50 m de profondeur

The slab 80 cm thick will be poured sheltered by a peripheral Berlin-type retaining wall allowing excavation down to a depth of 1.50 m

La ligne 4 fait route vers Montrouge



Photo 10

Les travaux de la station, qui constitue en quelque sorte la partie noble du lot 2, nécessitent deux attaques distinctes dont une au sud, au niveau du futur accès de la Place du Général Leclerc

The station works, which represent as it were the noble part of work section 2, require two separate working faces, including one in the south, at the level of the future Place du Général Leclerc access



pieux profonds qui supporteront le poids de la dalle. Une fois parvenu à la cote de -18,00 m, le radier sera exécuté et les voiles remontés depuis ce point bas jusqu'à venir se claver sous la dalle.

À noter qu'une seconde berlinoise a été réalisée place du Général Leclerc, l'exécution de l'ouvrage d'accès nécessitant l'installation d'un platelage métallique afin de maintenir la circulation automobile.

■ Renforcements à la petite cuillère

Un des points les plus délicats du projet résulte de la présence d'anciennes carrières non visitables, celles-ci ayant probablement été exploitées il y a 150 ou 200 ans lors des travaux d'extension de Paris. Cette zone,

qui s'étend sur une superficie d'environ 200 x 20 m, a été renforcée lors de l'édification de Montrouge la veine calcaire, exploitée sur une hauteur de 1,50 à 2,00 m, ayant été ponctuellement confortée par des piliers. Une partie du futur tracé traversant cette emprise, le projet nécessite donc une importante phase de consolidation en amont des travaux de creusement, intervention qui ne s'achèvera probablement qu'à la fin de l'année 2008.

L'impossibilité d'accéder à ce réseau souterrain et la configuration du chantier, excluant toute possibilité de mettre en œuvre des gros moyens, imposent donc la construction de petits puits creusés en traditionnel, au moyen de grues de puisatier (capacité une tonne), afin d'accéder au fond de l'assise de la carrière plus ou moins bien remblayée. Les déblais sont évacués manuellement, par l'intermédiaire de brouettes électriques et de seaux de 200 litres.

Ces interventions de renforcement s'effectuent par plots, afin de ne pas déstabiliser la carrière, chaque zone dégagée étant ensuite remplie de béton. Un coulis est ensuite injecté pour assurer le clavage du ciel de la carrière.

Le tunnel d'arrière-station (section finie 7,40 m), qui servira de zone technique pour la RATP et constituera, dans le futur, l'amorce de la seconde phase du projet en direction de Bagneux¹ sera, quant à lui, exécuté en traditionnel (pelle type Liebherr 902 équipée d'un BRH, d'une fraise ou d'un godet mine) à partir de deux puits d'attaque implantés Place du 8 Mai 1945 et Square République.

Quelques chiffres

L'ensemble du projet nécessitera l'extraction de 150 000 m³ de déblais entre Paris et Montrouge pour créer le tunnel, les quais, les couloirs, les salles et les accès de la nouvelle station Mairie de Montrouge. Près de 40 000 m³ de béton et 2 200 t d'acier seront introduits sous terre, sous forme de structures diverses, pour réaliser les ouvrages.

Le coût global de l'opération s'élèvera 169,119 millions d'euros, ce budget étant réparti entre cinq financeurs : RATP (17 %), Conseil général 92 (14 %), Ville de Montrouge (3 %), État (24 %), Région Île-de-France (42 %).

Photo 11

Vue partielle des anciennes carrières non visitables

Partial view of the old non man-entry quarries



1. À l'issue de l'enquête publique de 2004, c'est bien le projet d'ensemble du prolongement de la ligne 4 jusqu'à Bagneux qui a été déclaré d'utilité publique le 15 février 2005. Il faut maintenant tenir compte du financement. La première tranche jusqu'à Mairie de Montrouge est inscrite au contrat de plan État-Région 2000-2006. La seconde partie du projet, de Mairie à Montrouge à Bagneux, est inscrite au contrat de projets État-Région 2007-2013.

■ Tassements sous surveillance

Les travaux de percement du tunnel, situé à une profondeur moyenne de 15 m, se dérouleront entièrement hors nappe dans une géologie assez classique pour le sous-sol francilien : remblais, sables de Beauchamp, marnes et caillasses, calcaire grossier.

Les soutènements s'effectueront également de manière classique, avec mise en œuvre d'une couche de béton projeté à l'avancement, en recourant à toute la panoplie habituelle des moyens de renforcement – cintres réticulés, cintres lourds de type HEB, clous – en fonction du terrain rencontré. Des suivis de convergence sont, bien entendu, prévus au niveau des puits d'accès et à l'intérieur de la galerie, des moyens de suivis complémentaires étant programmés eu égard à l'étendue du chantier et la multiplicité des attaques simultanées (tolérances de 10 mm au niveau du bâti et 15 mm en chaussée).

Les interventions traditionnelles, réalisées par l'intermédiaire de brigades topo, seront complétées via l'installation d'un dispositif de suivi informatique permanent, comprenant des théodolites automatisés et le système transmettant les informations en temps réel par liaison Internet. ■

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

- Maître d'ouvrage : RATP
- Maître d'œuvre et OPC : XELIS
- Contrôle technique : Norisko
- Coordonnateur SPS : RATP
- Entreprises : Groupement Razel (mandataire) - Bilfinger Berger
- Durée des travaux : 30 mois

ABSTRACT *Line 4 heads toward Montrouge*

J.-Cl. Durand, O. Dufourd

Work section 2 involved construction of the future Mairie de Montrouge station and part of the double-tube tunnel which are part of the project for extension of the No. 4 metro line. One of the major problems is the presence of old non man-entry quarries that have to be consolidated in the sections passed through by the project. This part of the work, which will be completed at the end of the year, is performed by scraping little by little – using a well digger's crane, a 200-litre bucket and electric wheelbarrows – given the very limited space available. The main access, in the square of Saint-Jacques le Majeur church, will be executed by a mole protected by a Berlin-type retaining wall consisting of HEB steel sections anchored at a depth of 20 m, the weight of the slab being supported by columns cast in drilled shafts.

Tunnel driving will be performed by traditional methods, working on two faces simultaneously, using a Liebherr type excavator provided with partial-face cutting tools.

RESUMEN ESPAÑOL *La línea 4 se dirige hacia Montrouge*

J.-Cl. Durand y O. Dufourd

Los trabajos del lote 2 consisten en la ejecución de la futura estación Mairie de Montrouge así como una parte del túnel bitubos que figuran en el proyecto de prolongación de la línea 4 de metropolitano. Una de las principales dificultades reside en la presencia de antiguas carreteras que no se pueden visitar y que se deben consolidar en los tramos atravesados por el proyecto. Esta parte de los trabajos, que se acabará hacia finales de año, se efectúa con medios particulares – grúa de pocero, cubos de 200 litros y carretillas eléctricas – si se tiene en cuenta las condiciones de dominio sumamente limitadas. El acceso principal, plaza de la iglesia Saint-Jacques le Majeur, será realizada en excavación y protegida por una pared berlina formada por perfiles metálicos HEB anclados a 20 metros de profundidad, siendo el peso de la losa distribuido por los postes previamente cimentados. La excavación del túnel se efectuará de forma tradicional, a partir de dos ataques simultáneos, utilizando una pala de tipo Liebherr dotada de herramientas de corte puntuales.

La station de São Sebastião

Une nef d'exception

Dominique Moreau
 Directeur de production
 du groupement
 Spie Batignolles Europe

Dans le cadre du chantier d'extension de la ligne Rouge du métro de Lisbonne, l'exécution de la station de São Sebastião revêt un caractère exceptionnel par ses dimensions et son environnement urbain particuliers.

Un traitement du terrain constitué d'une double voûte de protection en colonne de jet complété par un boulonnage du front et associé à une sectorisation des phases d'excavation a conduit au succès de l'opération.

■ Présentation générale du projet

Le chantier du prolongement de la ligne Rouge du métro de Lisbonne constitue un projet crucial pour l'amélioration du réseau existant, puisqu'il permet l'interconnexion entre les trois principales lignes de ce réseau (figure 1).

Il est constitué principalement par un tronçon de 1 440 m de tunnel réalisé au tunnelier EPB TBM (diamètre d'excavation de 9,85 m), un tronçon de 560 m de tunnel NATM en voie double et de 210 m en voie simple, deux stations (Saldanha II en « cover and cut » et São Sebastião II en NATM), un puits d'attaque pour le tunnelier, et deux postes de ventilation intermédiaires. La nouvelle ligne croise donc deux lignes de métro existantes au niveau des nouvelles stations, celles-ci étant en interface avec les stations anciennes (Saldanha I et São Sebastião I) (figure 2).

Le contrat est entré en vigueur le 21 juillet 2003. Les galeries sont actuellement toutes réalisées, les travaux actuels se concentrant sur les stations dont le génie civil est prévu s'achever pour la fin de cette année, permettant une mise en service de cette extension en août 2009.

■ La station São Sebastião

Le projet de base, sous la responsabilité du client, prévoyait que la station soit réalisée à ciel ouvert, à l'abri d'une paroi ancrée constituée de pieux béton. Compte tenu de l'impact négatif sur la circulation dans cette zone très commerçante, la mairie de Lisbonne n'a pas accepté cette solution. Le client a alors repris à son compte une solution de station enterrée que le groupement d'entreprises avait présentée en variante lors des négociations préalables à la signature du contrat. La station nouvelle est constituée par les éléments suivants :

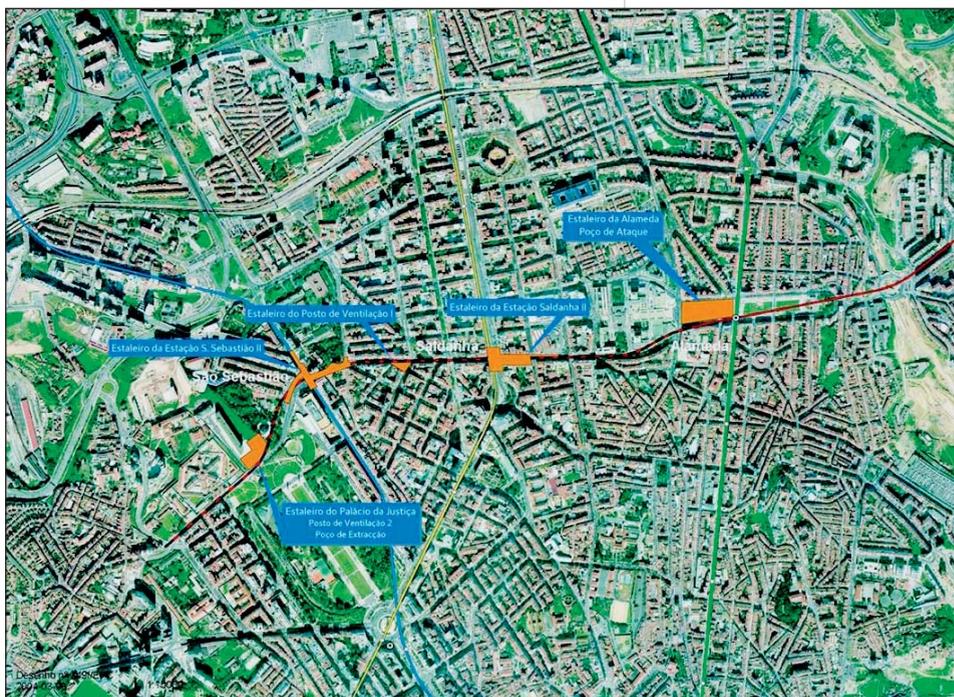


Figure 1
 Implantation du chantier
 Site layout

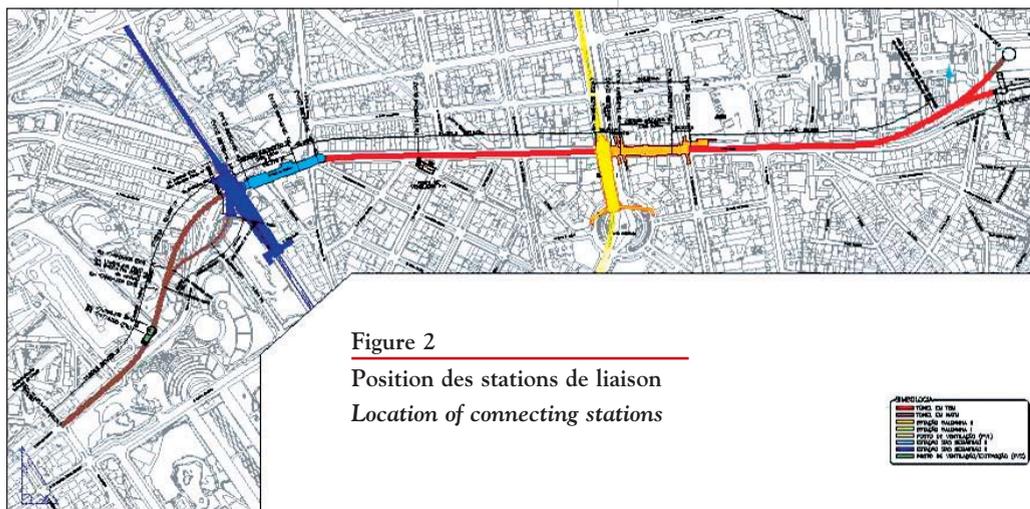


Figure 2
 Position des stations de liaison
 Location of connecting stations

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Nef São Sebastião

- Jet grouting : 5 600 m³
- Tubes acier en armature du jet : 10 000 ml
- Boulons de fibre de verre : 23 000 ml
- Béton projeté non fibré C20/25 : 6 500 m³
- Cintres réticulés : 230 t
- Excavation : 45 000 m³

La station de São Sebastião. Une nef d'exception

Photo 1

Puits Est - Traitement du front pour excavation de la nef
 East shaft - Face treatment for excavation of the nave



- un puits Est rectangulaire de 15 m x 20 m et de 26 m de profondeur, ayant servi pour l'extraction du tunnelier et constituant l'attaque pour l'excavation de la nef (photo 1);
- un puits ouest, attenant à la station existante de section circulaire de 13 m de diamètre, constituant une seconde attaque à la nef (photo 2);
- une nef de 160 m de long, présentant une section élargie à ses deux extrémités (65 ml à l'ouest et 53 ml à l'est) et une section réduite en son centre sur 42 ml;
- une galerie de liaison entre le puits ouest et le tunnel de voie double, passant sous la station existante en exploitation;
- une zone d'extension de la station existante à l'ouest, réalisée à ciel ouvert, à l'abri de parois ancrées constituées de pieux en béton.

La principale difficulté de ce projet découle des dimensions imposantes de la nef (largeur 18 m x hauteur 14 m) associées à la faible couverture de terrain (environ 5 m), terrain dont les premiers mètres sont fortement remaniés par les réseaux urbains.

Photo 2

Puits ouest - Vue extérieure
 West shaft - Exterior view



■ La géologie

Les trois premiers mètres sont constitués de remblais récents de faibles caractéristiques. Les 8-10 m suivants appartiennent à la formation de Benfica, composée de couches sédimentaires variées, allant du sable fin ou grossier, faiblement argileux, en passant par des arénites argileuses, voire des marnes compactes. La partie infé-

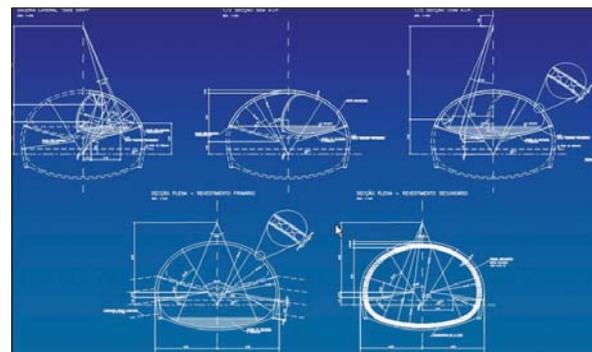


Figure 3

Phases d'excavation de la nef - Sections types
 Nave excavation phases - Typical cross sections

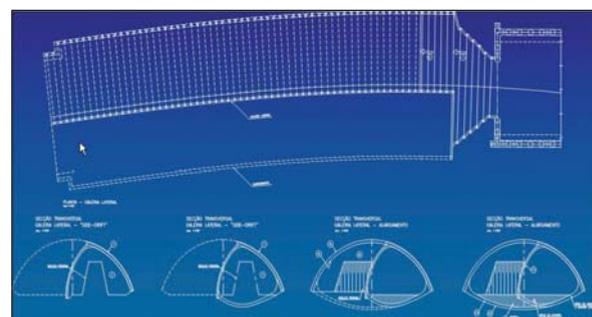


Figure 4

Excavation « side drift » et élargissement
 Side drift excavation and widening

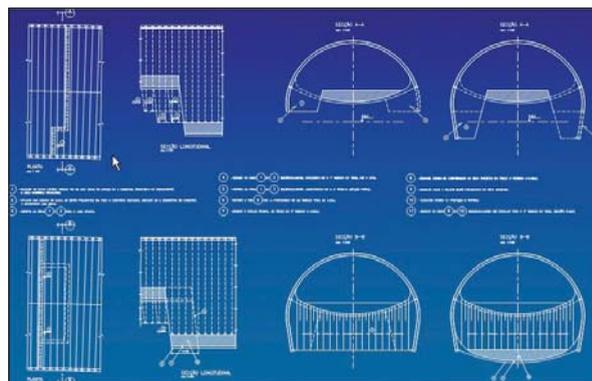


Figure 5

Excavation rabaissement
 Lowering excavation



Photo 3

« Side drift » et élargissement - Vue depuis le front ouest
Side drift and widening - View from the West face

rière est située dans le complexe volcanique de Lisbonne, composé principalement de basaltes plus ou moins altérés avec intercalation de tufs.

■ La solution proposée

Les études d'exécution ont été réalisées en totalité par le bureau d'études CJC (Brésil) : études d'architecture, de structure, réseaux et électromécanique, pour le compte du client.

La solution choisie pour l'excavation de la nef associe un soutènement renforcé, une sectorisation de l'excavation (méthode NATM, voir phasage détaillé sur les figures 3, 4 et 5) avec faible avancement, et un suivi systématique des mouvements par instrumentation topographique.

Soutènement

Pour le renforcement du terrain en voûte, ont été réalisées deux lignes superposées de colonnes de jet grouting subhorizontales de diamètre 30 à 50 cm, armées d'un tube d'acier, en voûte parapluie à l'avancement tous les 7 m avec un recouvrement de 2 m.

Pour le renforcement du front, un boulonnage en fibre de verre en armature d'une colonne de jet grouting ou simplement injecté a été mis en place, suivant la géologie rencontrée.

Le revêtement primaire est constitué de cintres réticulés tous les mètres associés à un béton projeté de 40 cm d'épaisseur.

Sectorisation (photos 3 à 7)

La section d'excavation se décompose en :

- galerie latérale « side-drift » recevant un pied de cintre provisoire et un radier en béton projeté armé de treillis soudé, avec un pas d'avancement d'un mètre;



Photos 4 et 5
 Section en phase de rabaissement
Section during lowering phase



Photo 6
 Section achevée (revêtement primaire)
Completed section (primary lining)



Photo 7
 Section après exécution du radier définitif
Section after execution of the final invert



La station de São Sebastião. Une nef d'exception

Photo 8

Revêtement définitif de la voûte -
Coffrage CIFA
Final lining of the arch -
CIFA formwork



Photo 9

Application de la membrane
d'imperméabilisation
Application
of the waterproofing
membrane

- à 20 m en retrait, galerie d'élargissement avec radier général en arc inversé en béton projeté armé de treillis soudé, avec un pas d'avancement d'un mètre;
- à 20 m en retrait, un premier rabaissement de la section avec excavation latérale, prolongement des pieds de cintres et du revêtement en béton projeté, renforcement des pieds par des boulons Swellex, avec un pas d'avancement de deux mètres (excavation dans le basalte);
- décalé de 10 m, le deuxième rabaissement latéral avec prolongement final des pieds de cintres et du revêtement en béton projeté, avec un pas d'avancement de deux mètres, excavation du noyau central et réalisation de la voûte inversée par tronçon de 4 m.

Instrumentation

Les diverses sections d'excavation ont été équipées de réflecteurs pour mesure journalière des convergences. En surface, des plots de tassement, des mires topographiques ont permis le suivi des mouvements du sol et des édifices environnants. Le mouvement maximum observé sur la voûte est d'environ 40 mm.

Points singuliers

Injections chimiques

À environ 25 m du puits Est passe perpendiculairement à l'axe de la nef une conduite d'eau de ville en béton armé de 1 m de diamètre intérieur et en charge (6 bars). Cette conduite, déjà ancienne, risquait de se rompre sous l'effet des tassements prévisibles et interférait avec les colonnes de jet en voûte parapluie, rendant celles-ci impossibles à exécuter.

Devant le refus du concessionnaire d'interrompre la distribution d'eau dans cette conduite le temps d'exécuter l'excavation de la nef, la solution choisie a consisté à introduire à l'intérieur de la conduite existante un tube d'acier de 800 mm, poussé en tronçons soudés entre eux à partir d'un puits latéral. L'interruption du service a ainsi été limitée à environ deux mois.

En remplacement des colonnes de jet, il avait été présenté une première solution de traitement du terrain par injection chimique à partir de l'intérieur de la nef. Outre l'inconvénient que ces injections iraient retarder l'excavation, elles faisaient courir un risque important du fait de la présence, outre de la conduite d'eau, d'une multitude de câbles électriques (HT ou BT), de communication (fibre optique) ainsi que d'une conduite de gaz. Aussi, le chantier opta pour l'exécution de ce traitement à partir de la surface.

Après mise à vue et levé topographique des différents réseaux et définition en 3D des tirs d'injection, les travaux se sont réalisés en trois phases successives, afin de réduire l'impact sur la circulation des véhicules.

Traitement des reflux provenant du jet

Du fait du volume très important de jet réalisé et des préoccupations environnementales permanentes sur ce projet, il a été installé sur chaque front un dispositif en deux étapes pour le traitement des boues de reflux. Dans un premier temps, les boues sont récupérées au front et pompées jusqu'à un bac de décantation (benne Sécatol de 15 m³) disposé en fond de puits. Lorsqu'un bac est plein, le pompage est transféré sur le bac voisin. Trois bennes sont ainsi disposées en fond de puits, plus deux autres en surface. Lorsqu'une benne est pleine, elle est transférée en surface et remplacée par une benne vide.

Dans un deuxième temps, après décantation d'environ 24 heures, les eaux superficielles sont pompées vers le réseau d'égouts municipal. Du fait de son PH (eau très fortement chargée en ciment), le rejet subit une correction de PH grâce à un dispositif de pompe doseuse injectant de l'acide proportionnellement au débit rejeté.

Les boues résiduelles sont mélangées aux déblais d'excavation et transportées en décharges agréées.



Photo 10

Revêtement définitif de la voûte - Négatifs pour niches
Final lining of the arch - Negative projections for recesses

■ L'exécution des travaux

Les travaux ont été réalisés en 11 postes par semaine entre le 25 août 2006 (attaque galerie latérale à partir du puits Est) et le 13 juillet 2007 pour la section supérieure (« side-drift » + élargissement) et du 14 mai 2007 au 26 novembre 2007 pour les deux phases de rabaissement.

Pour l'excavation, on a utilisé des pelles hydrauliques de 35 t pour la section supérieure puis de 45 t pour les rabaissements dans le basalte, équipées de godet, *ripper*, marteau hydraulique et fraise. Il n'a pas été nécessaire d'utiliser d'explosif dans le basalte, ce qui était envisagé compte tenu des valeurs de résistance à la compression pouvant atteindre 150 bars.

Le revêtement définitif a été réalisé en cinq phases successives : exécution du radier, profilage du revêtement primaire, installation de la membrane d'imperméabilisation et des drains en pieds de voûte à partir d'un échafaudage mobile de 6 ml, montage des armatures en voûte depuis un second échafaudage de 12 ml, bétonnage en avancement de 6 ml au moyen d'un coffrage CIFA de 6 ml (photos 8 à 10). Le cycle de bétonnage a été d'environ 3 jours utiles.

■ Conclusion

Le groupement s'était interrogé sur la réelle nécessité de mise en œuvre d'un soutènement aussi important. Les déformations constatées et les mesures faites ont confirmé les valeurs des modélisations et justifié le revêtement provisoire projeté par le concepteur.

À la satisfaction du client, le groupement a réalisé cette excavation audacieuse de 18 m de portée et de 14 m de hauteur sans désordre significatif en surface ou sur les bâtiments adjacents, en toute sécurité pour son personnel et dans les délais globaux prévus. ■

ABSTRACT São Sebastião station. An exceptional nave

D. Moreau

Construction of the São Sebastião station, carried out as part of the extension project on the Red line of the Lisbon metro, is exceptional in nature due to its dimensions and its specific urban environment. Soil treatment consisting of a double jet-grouting-column protective arch supplemented by rockbolting of the face and combined with sectoring of excavation phases made the project a success.

RESUMEN ESPAÑOL Estación de São Sebastião. Una nave de excepción

D. Moreau

Situándose en el marco de la obra de ampliación de la línea Roja del metro de Lisboa, la ejecución de la estación de São Sebastião presenta un carácter excepcional debido a sus dimensiones y su entorno urbano particular. Un tratamiento del terreno formado por una doble bóveda de protección en columna de chorro completado por una fijación del frente y combinada a una sectorización de las etapas de excavación condujeron al éxito de la operación.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Metropolitano de Lisboa, E.P.

Maitre d'œuvre

Ferconsult

Entreprises

Groupement solidaire Somague (mandataire), Bento Pedroso (Odebrecht), Mota-Engil, Spie Batignolles Europe

Montant du marché

Environ 105 millions d'euros

Étude de dangers souterrains

Setec TPI et Bouygues TP ont conduit en partenariat sur plusieurs chantiers souterrains (laboratoire Andra de Bure, rénovation du tunnel ferroviaire du Fréjus, second tube du tunnel routier de Toulon) des études en vue d'établir, avec un objectif de cohérence système et par le biais d'analyses qualitatives, les dispositions techniques, matérielles et d'organisation en vue d'assurer la mise en sécurité des personnels et leur sauvegarde en cas d'incendie. Ces études examinent les fonctions habituelles de prévention s'opposant au départ d'un incendie mais également de prévision (alarme, alerte, protection, évacuation, recueil temporaire si l'évacuation immédiate est impossible...).

La méthode consiste à :

- caractériser et dimensionner par calcul les incendies potentiels en analysant les données techniques et les constituants des engins de chantier;
- étudier par modélisation numérique le système de ventilation en place;
- déterminer par analyse comparative les stratégies les plus appropriées à mettre en œuvre en cas d'incendie, ces stratégies étant adaptées aux spécificités de chaque chantier;
- proposer des solutions techniques et des procédures en termes de prévention et de prévision;
- proposer des objectifs opérationnels pour le chantier;
- proposer des objectifs opérationnels aux sapeurs pompiers territoriaux.

La sécurité des travailleurs est soumise, à un arsenal réglementaire prescriptif de diverses dispositions à mettre en œuvre.

Dans certaines circonstances pour les chantiers souterrains, elles sont impossibles à mettre en œuvre, pour d'autres cas elles sont transposables en partie seulement, enfin il arrive que le constructeur se trouve confronté à un vide prescriptif ou juridique.

Aussi, il peut apparaître nécessaire voire indispensable de conduire des études de dangers permettant de caractériser les risques, d'étudier la manière de les supprimer ou de les réduire, et de déterminer les meilleures procédures et moyens d'y faire face en cas de survenance afin de permettre la sauvegarde des travailleurs et dans une certaine mesure l'intervention des services de secours publics.

Les risques considérés comme classiques (chute de hauteur, écrasement de personne, risques électriques...) étant bien encadrés par la réglementation, les études conduites pour les chantiers du Laboratoire Andra de Bure, de la rénovation du tunnel ferroviaire du Fréjus et du second tube du tunnel routier de Toulon ont eu pour objet l'incendie de chantier, danger le plus redouté au regard de ses effets (opacité, température, toxicité, difficultés d'évacuation, difficultés d'accès des secours...) et du nombre potentiel de travailleurs impliqués.

C'est cette démarche qui est présentée et illustrée ci-après.

■ Démarche illustrée

La démarche commence lorsque cela est possible par une visite du chantier. Elle se poursuit par le recueil des données d'entrée qui doivent être précises car elles conditionnent la bonne conduite de l'étude et la précision des résultats :

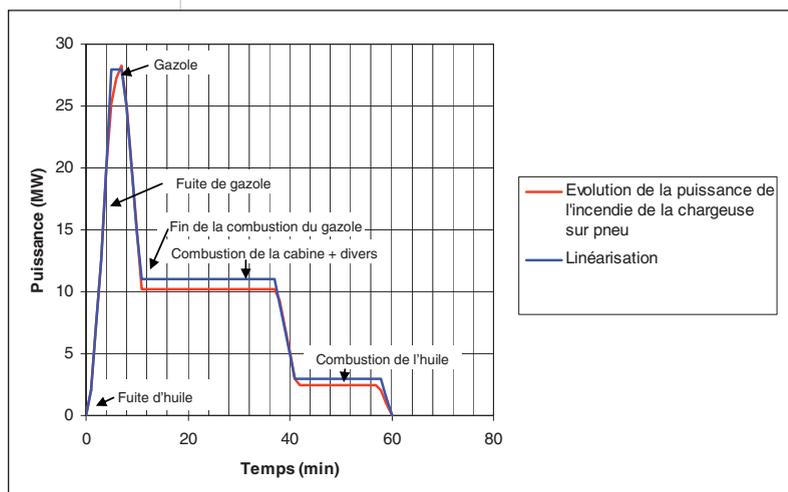
- organisation du chantier;
- planning;
- nombre et répartition spatiale des postes de travail;
- occupation en travailleurs;
- caractéristiques des engins mis en œuvre;
- produits dangereux, inflammables, explosifs mis en œuvre;
- dispositions et équipements de sécurité déjà prévus;
- système de ventilation chantier prévu (caractéristiques techniques et mise en œuvre), etc.

L'étude à proprement parler peut alors débuter par la caractérisation de l'incendie redouté; pour cela les données techniques des engins sont analysées au regard de leurs constituants (types de matière) et des potentiels calorifiques mobilisables (quantité x PCI) (PCI = Potentiel calorifique inférieur).

Figure 1

Courbe d'incendie d'une chargeuse sur pneu du chantier de construction du second tube du tunnel de Toulon

Fire curve for a wheeled loader on the construction site of the second tube of Toulon tunnel



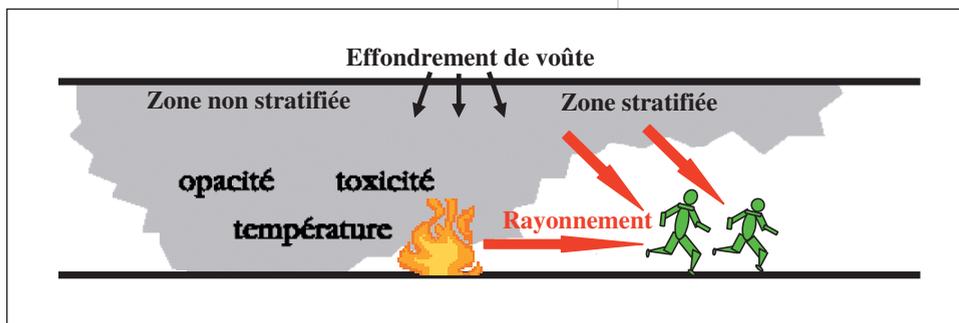
(incendie) en travaux

Jean-Michel Vergnault
 Directeur d'études
 Sécurité
 Setec TPI

Jocelyn Trognon
 Chargé QSE TP France
 Bouygues TP

Figure 2

Illustration des effets dangereux d'un incendie
 Illustration of the dangerous consequences of a fire



Un scénario réaliste au regard du chantier (on vérifie notamment que l'incendie bénéficie de suffisamment d'oxygène pour se développer) est alors défini afin d'établir une courbe d'incendie (montée en puissance, plateau, retombée). Cette courbe est alors lissée afin de poursuivre l'étude à partir de courbes standardisées. La figure 1 montre en rouge la courbe d'incendie calculée et en bleu la courbe linéarisée pour la poursuite de l'étude.

Cette courbe peut alors être « injectée » dans un logiciel de modélisation numérique de ventilation (1D ou 3D selon la configuration du chantier) afin d'obtenir les données des paramètres environnementaux pouvant mettre en échec une bonne évacuation des travailleurs : opacité, toxicité, température, rayonnement. La figure 2 illustre les paramètres dangereux.

Les figures 3, 4 et 5 permettent de donner une réalité physique aux conditions environnementales d'évacuation, opacité, toxicité, température. Les distances (m) sont repérées en abscisse et le défilement du temps (s) en ordonnée. Les couleurs représentent les paramètres observés (opacité K en m^{-1} qui traduit la distance de visibilité, la toxicité du CO en ppm et la température en $^{\circ}C$).

Le déplacement des personnes est représenté par des flèches recevant une pente plus ou moins importante en fonction de la vitesse de marche permise par le niveau observé d'opacité.

La figure 3 permet de se rendre compte que les travailleurs qui seraient contraints à une évacuation du côté des fumées seraient ralentis par le manque de visibilité au bout d'environ 7 à 8 minutes et devraient cheminer dans cette ambiance pendant environ 1h20 (4900 s) avant d'atteindre le premier refuge disponible pour s'y abriter.

La figure 4 montre qu'au bout d'environ 8 min les travailleurs sont soumis à une toxicité > 500 ppm de CO. En outre, dans le cas particulier de ce chantier, leurs appareils respiratoires de fuite ne disposent plus que de 10 min d'autonomie alors qu'ils doivent encore

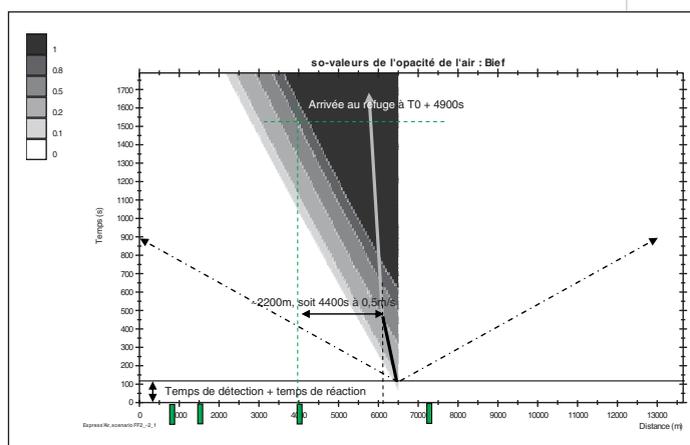


Figure 3

Données de sortie opacité
 Opacity output data

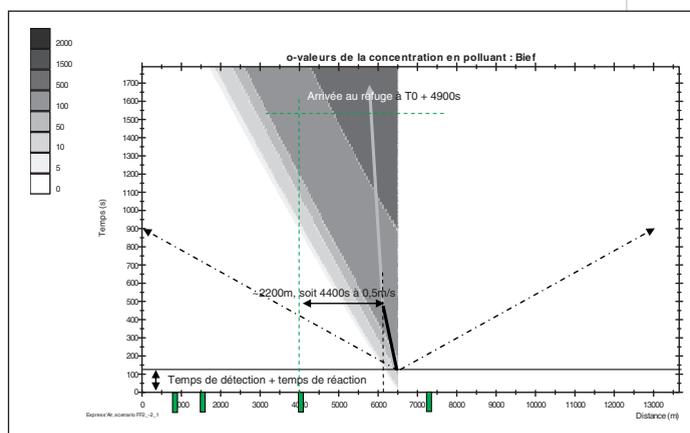


Figure 4

Donnée de sortie toxicité (monoxyde de carbone)
 Toxicity output data (carbon monoxide)

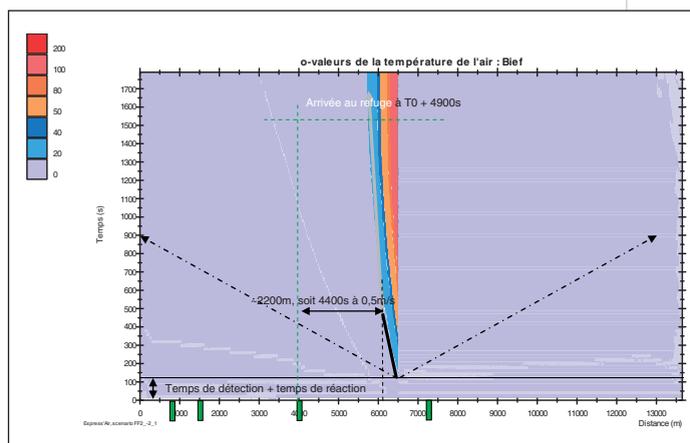


Figure 5

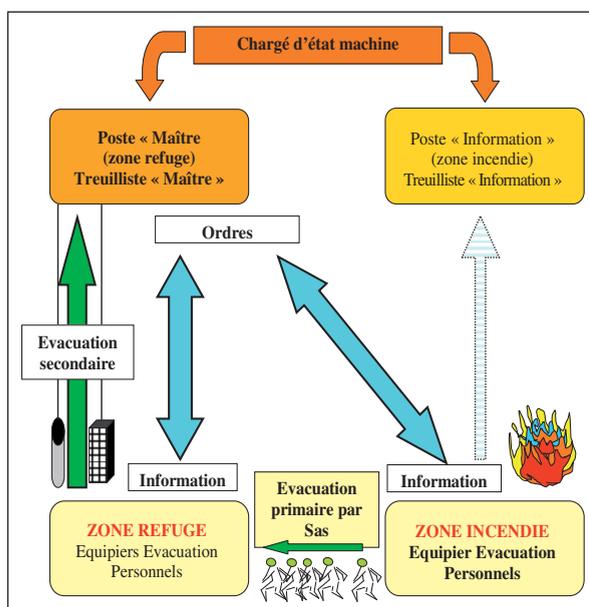
Donnée de sortie température
 Temperature output data

Étude de dangers (incendie) en travaux souterrains

Tableau I
Exemple de propositions d'équipements
Example of proposed equipment

Rubriques	Propositions
Protection respiratoire des personnels en évacuation	<ul style="list-style-type: none"> • 1 appareil de protection respiratoire autonomie 20 à 60 mn par homme sur train d'approvisionnement et train de relève • 1 appareil de protection respiratoire autonomie 20 à 60 mn + 1 appareil de protection respiratoire 90 à 270 mn par homme sur trains de travaux • 1 pince-nez et 1 paire de lunettes étanches par appareil de protection respiratoire • Former et entraîner les personnels au changement d'appareil Biocell en apnée de courte durée et par binôme
Protection physique des personnels	Couvertures de protection ignifuge
Accessibilité aux équipements de protection et de secours	<ul style="list-style-type: none"> • Au plus près du sol pour une accessibilité par les personnels sans avoir à grimper sur les wagons • Accessibilité permanente y compris lorsque le train d'approvisionnement est situé en parallèle
Vitesse d'évacuation à pied	<ul style="list-style-type: none"> • Jalonnement lumineux par BASE • Projecteurs portables grandes puissance et autonomie par binôme en caisse d'équipements de secours
Refuges/quantité	<ul style="list-style-type: none"> • Refuge conteneur 18 hommes au point frontière • Refuge « en dur » au PM 4025 • Refuge conteneur 12 hommes au PM 1500 • Refuge « en dur » au PM 840
Refuge conception	Sas coupe feu (sauf refuges conteneurs)
Refuge équipement	Réserve en air comprimé d'une autonomie conforme au PGCSPS (8 à 12 h 00) avec masques respiratoires pour 10 hommes, éclairage d'ambiance (si possible secouru), moyen de communication avec l'extérieur, réserves en eau et tinette, panneaux rappelant le mode d'emploi du refuge, cartouches relais d'appareil de protection respiratoire...
Refuge perception	Reconnaissance au toucher (arceau), éclairage spécifique, panneaux ...
Citernes : embarquées de gasoil	<ul style="list-style-type: none"> • Protection contre le rayonnement et la température d'un incendie pour limiter les propagations • Bac de rétention à sable largement dimensionné

Figure 6
Exemple de schéma d'organisation de l'évacuation (chantier puits de Bure)
Example of evacuation organisation plan (Bure shaft site)



cheminer environ 1h00 avant d'atteindre le refuge. Leur chance de survie dans un tel environnement est donc plus que compromise.

La figure 5 montre qu'au cours de leur évacuation les travailleurs ne sont pas soumis à des niveaux de température pouvant mettre leur vie en danger.

■ Les apports de ces études

Le premier apport de taille est de pouvoir déterminer la procédure la plus adaptée en ce qui concerne la ventilation de chantier. Dans de nombreux cas on observe qu'il est préférable de l'arrêter dans les plus brefs délais d'une part afin de ne pas favoriser le développement de l'incendie (apport d'O₂) et d'autre part afin de limiter la migration des fumées vers l'emprise totale du chantier.

Le second apport non moins significatif est d'avoir une idée assez précise du niveau de mise en danger des personnels et des délais dans lesquels ils peuvent se trouver dans une situation pouvant menacer leur vie. Ayant une connaissance de ces paramètres, il est alors possible de rechercher des mesures de prévention visant à limiter la probabilité de survenue de l'incendie. Ces mesures peuvent concerner des modifications des engins de chantier par exemple, afin de limiter le risque d'inflammation et la puissance de l'incendie redouté (remplacement de composants combustibles par des non ou peu combustibles, dispositifs de protection, etc.). Elles peuvent également concerner l'organisation du chantier et les procédures (plan de circulation, maintenance renforcée, contrôles, travaux par points chauds, etc.).

Dans le cas où l'incendie surviendrait malgré tout, la connaissance des effets probables permet de mettre en place des mesures de prévision adaptées :

- alarme;
- alerte;
- équipements de protection individuels et collectifs adaptés;
- zones de regroupement;
- proximité-éloignement des abris;
- équipement d'extinction (inertage des engins de chantier);
- équipement de lutte et de protection;
- organisation des procédures d'évacuation, etc.

(cf. tableaux I, II, III, IV et figure 6). Enfin, et cet apport n'est pas des moindres, les données de sortie de telles études fournissent aux personnels d'encadrement du chantier des éléments tangibles de sensibilisation à la sécurité incendie pour l'ensemble des intervenants ainsi que des supports pour l'élaboration du contenu de leur formation périodique.

Rubriques	Propositions
Ventilation	Arrêt immédiat en cas d'incendie (Réalisateur)
Direction d'évacuation	<ul style="list-style-type: none"> • Amont aérage • Eloignement de l'incendie
Moyen d'évacuation	Train en priorité
Evacuation	<ul style="list-style-type: none"> • Sous responsabilité locale du responsable du train incendié en concertation avec le réalisateur y compris en période de simultanée • Codification des trains • Train en amont aérage en appui à l'évacuation par approche du train incendié • Train en aval aérage en attente jusqu'à levée de doute ou arrivée des fumées • En cas d'évacuation avec aléa d'impossibilité de franchissement de l'incendie, ne pas envoyer le train de relève afin de laisser la voie libre pour les engins rail-route des sapeurs pompiers
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance permanente par les responsables de train du sens de l'aérage, de l'organisation du chantier, du nombre et de la localisation des autres trains • Information des responsables de train en cas d'inversion d'aérage • Codification des trains
Radio	Canal d'urgence en écoute à tous et discipline de procédure
Ravitaillement en gasoil	<ul style="list-style-type: none"> • Arrêt de l'activité chantier, trains prêts à l'évacuation • Equipier intervention à poste en protection avec extincteur lourd
Planification	A préparer avec les sapeurs pompiers français et italiens, les exploitants ferroviaires et les responsables du chantier italien

Tableau II
Exemple de propositions de procédures
Example of proposed procedures

Rubriques	Propositions
Trains en tunnel	<ul style="list-style-type: none"> • 1 chef d'équipe, responsable train et évacuation (par train) • 1 équipier incendie (par train) 1 équipier incendie (par train) • 1 secouriste du travail (par train)
Extérieur	<ul style="list-style-type: none"> • 1 réalisateur en relation permanente avec les trains de chantier pour mesures d'urgence immédiates (arrêt ventilation notamment) • 1 responsable chantier

Tableau III
Exemple de propositions concernant les personnels
Example of proposals concerning personnel

Rubriques	Propositions
Planification d'urgence	Définition de procédure d'urgence chantier concertée avec les sapeurs pompiers italiens, les opérateurs ferroviaires et les responsables du chantier italien
Formation et entraînement	<ul style="list-style-type: none"> • Visites périodiques de l'ouvrage et du chantier • Exercices communs SDIS/groupement de travaux : périmètre à définir en concertation (personnel concerné, type et fréquence des entraînements et/ou exercices...)

Tableau IV
Exemple de propositions aux pompiers
Example of proposals for fire fighters



Étude de dangers (incendie) en travaux souterrains

► ■ Conclusion

Ces études, à partir de l'examen des données d'entrée relatives au chantier dans ses différentes composantes, ont permis d'assurer des conditions techniques, matérielles et organisationnelles permettant :

- de réduire le risque d'occurrence d'un incendie;
- d'assurer la sauvegarde des personnels, si nécessaire;
- de répondre aux exigences réglementaires;
- d'établir un véritable programme de formation et d'entraînement.

Cette démarche a, en outre, été considérée comme très professionnelle, et a reçu un accueil très favorable des parties intéressées, maître d'ouvrage, maître d'œuvre, inspection du travail, CRAM et pompiers. ■

ABSTRACT *Dangers (fire) study for underground works*

J.-M. Vergnault, J. Trognon

In partnership Setec TPI and Bouygues TP have led studies on several subterranean construction sites (Andra Laboratory of Bure, Renovation of the railway tunnel of Fréjus, 2nd tube of the road tunnel of Toulon) to establish, with an objective of system coherency and by means of qualitative analyses, the technical, material and organizational measures to assure the putting in a safe place of the staffs and their rescue in case of fire.

These studies examine the usual safety functions of prevention but also of response opposing from a fire (Alarm, Alert, Protection, Evacuation, Temporary Collection if the immediate evacuation is impossible...).

The method consists in :

- *characterize and size by calculation the potential fires by analyzing the technical data and the constituents of the machines of construction site;*
- *study the ventilation system with a Computational Fluid Dynamics model;*
- *define by a comparative analysis of the best possible strategies to implement in case of fire, each one being adapted to the specificities of the actual construction site;*
- *propose operational objectives in terms of training, fire prevention and response;*
- *propose operational objectives to surrounding fire brigades (site visits and training, exercises...).*

RESUMEN ESPAÑOL *Estudio de peligros (incendio) en trabajos subterráneos*

J.-M. Vergnault y J. Trognon

Setec TPI y Bouygues TP realizaron en colaboración varias obras subterráneas (laboratorio Andra de Bure, renovación del túnel ferroviario del Fréjus, segundo tubo del túnel viario de Tolón) diversos estudios con el propósito de establecer, mediante un objetivo de coherencia sistema y por mediación de análisis cualitativos, las disposiciones técnicas, materiales y de organización con objeto de garantizar la puesta en seguridad del personal y su salvaguardia en caso de incendio.

Estos estudios examinan las funciones habituales de prevención que permiten luchar contra el inicio de un incendio así como también de previsión (alarma, alerta, protección, evacuación, zona de espera si la evacuación inmediata resulta imposible, etc.).

El método consiste en :

- *caracterizar y dimensionar por cálculo los incendios potenciales mediante el análisis de los datos técnicos y los constituyentes de las maquinarias de obra;*
- *estudiar por modelización digital el sistema de ventilación instalado;*
- *determinar mediante análisis comparativo las estrategias más adecuadas que caben implementar en caso de incendio, dichas estrategias siendo adaptadas a las especificidades de cada obra;*
- *proponer diversas soluciones técnicas y procedimientos en términos de prevención y de previsión;*
- *proponer objetivos operativos para la obra;*
- *proponer objetivos operativos a los bomberos territoriales.*

Des solutions routières pour l'aménagement d'un tunnel ferroviaire

Frédéric Gratessolle
Directeur
d'établissement Grands Travaux Béton
Appia Grands Travaux

Dans le cadre des aménagements du tunnel ferroviaire du Perthus, Eiffage Travaux Publics, au travers de sa filiale Appia Grands Travaux a proposé au groupement TP Ferro un projet mettant en application des techniques routières pour la réalisation du radier support des voies et des quais permettant l'évacuation des voyageurs et le passage des réseaux techniques (figure 1).

Crédit photos : Étienne Gérard - Photothèque Appia Grand Travaux

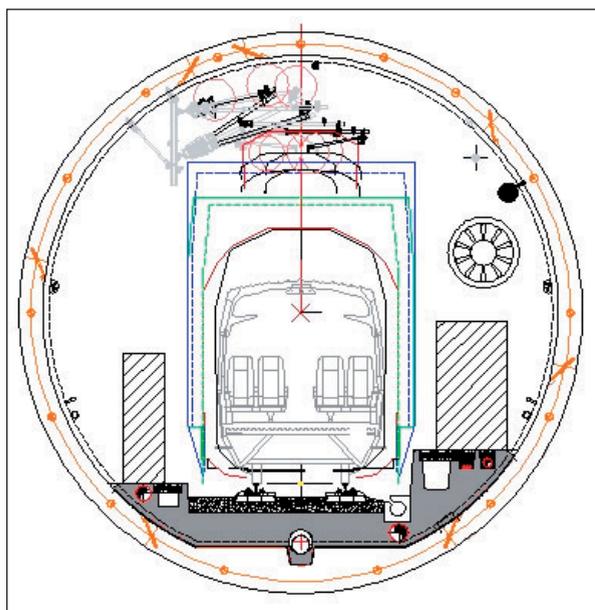


Figure 1
Section train du tunnel du Perthus
Train section of the Perthus tunnel

Le projet consiste à aménager un tunnel ferroviaire composé de deux tubes de 9,20 m de diamètre reliés par des rameaux tous les 200 m. Un radier doit être coulé pour la pose de la voie ferrée. De part et d'autre un quai doit être réalisé. Côté rameau, il permettra l'évacuation des personnels et la mise en place de câbles électriques divers (quai haut); côté extérieur (quai bas), seront enfouis les fourreaux de passage de réseaux techniques (figure 2).

Appia Grands Travaux a imaginé de réaliser ces ouvrages par les techniques du coffrage glissant et d'approvisionner le béton par des engins roulants à partir de centrales installées à environ 1200 m de l'entrée du tunnel (photo 1). Pour le guidage des

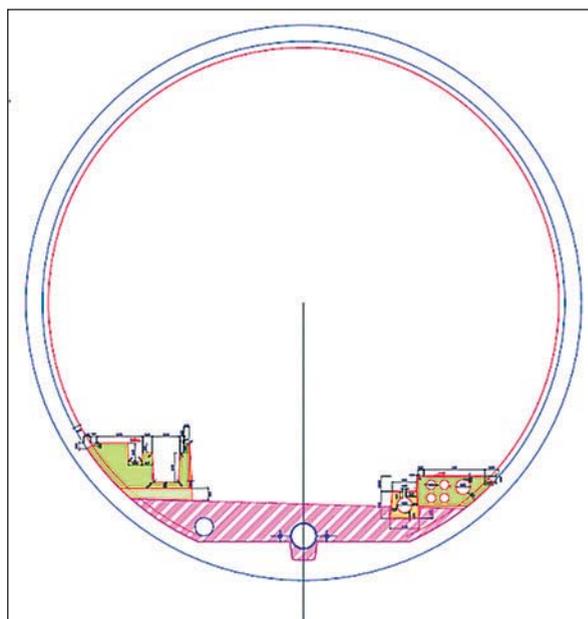


Figure 2
Section à réaliser
Section to be executed



Photo 1
Mise en place de la machine pour radier à l'entrée du tube
Setting up the invert pouring machine at the tube entrance

machines, un système sans fil a été retenu compte tenu des contraintes et des tolérances demandées.

Un an avant la réalisation de ces aménagements, une première étude de faisabilité a permis de transformer le projet, initialement prévu de façon traditionnelle, en ouvrages pouvant être mis en œuvre avec des machines à coffrages glissants.

Une fois le projet accepté, l'énergie des bureaux d'études s'est concentrée sur la conception et réalisation des matériels évoluant dans un environnement de tunnel ferroviaire. Ainsi, la machine à coffrage glissant utilisée pour les chaussées en béton, qui se déplace généralement sur une surface plane, et dont la largeur de travail est l'espace entre chenilles, doit se mouvoir dans un

Des solutions routières pour l'aménagement d'un tunnel ferroviaire



Photo 2
Plate-forme de croisement
Cross-passage platform

tube et avoir une largeur de travail supérieure à l'écartement entre chenilles.

Les machines à béton extrudé utilisées pour les quais, doivent tenir compte, quant à elles, des contraintes liées à l'exiguïté du tunnel.

Le matériel retenu est une machine à béton extrudé équipée de quatre trains de chenilles inclinables qui lui permettent de se déplacer en appuis sur les flans du tube, et de tables auxiliaires de bétonnage en arrière de machine. Celles qui servent à extruder les quais ont été équipées en trois chenilles, dont une chenille avant étroite, pour tenir compte de l'en-

Photo 3
Alimentateur frontal intégrant une plate-forme de retournement
Front-end feeder including an overturning platform

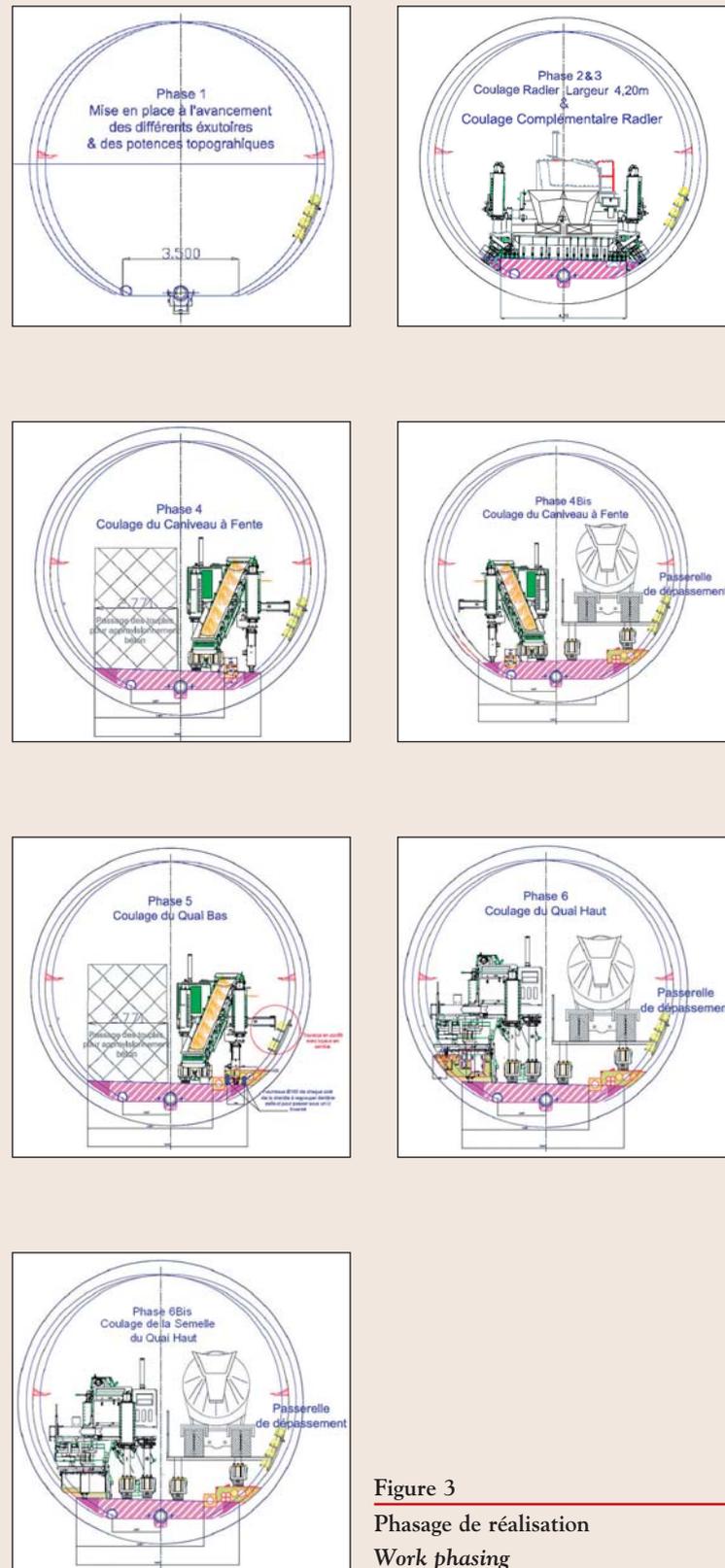


Figure 3
Phasage de réalisation
Work phasing



Photo 4
 Mise en œuvre du radier
 Placing the invert

combremment et des réseaux devant être intégrés dans l'ouvrage.

À ce stade, la principale difficulté à traiter reste l'approvisionnement en béton des machines, ou plus clairement, comment faire circuler des camions dans un tunnel de plus de 8 km dont le gabarit ne permet aucun croisement sans aménagement. La solution de véhicules double cabine a été assez rapidement abandonnée au profit de véhicules plus traditionnels.

Pour la partie radier, le choix s'est porté sur des camions courts équipés de bennes de 6 m³. Pour l'approvisionnement des quais, la solution de transport en camion malaxeur traditionnel a été retenue.

En phase de coulage de radier, deux plates-formes de croisement (photo 2), pouvant accueillir jusqu'à neuf camions, et un alimentateur frontal (photo 3) équipé d'une plate-forme de retournement ont été réalisées pour que les camions bennes puissent livrer le béton vers l'atelier, et revenir à la centrale.

Lors de la réalisation des quais, le croisement des touppies et de l'atelier de mise en œuvre a pu se faire en phase de coulage du premier quai (quai bas); lors du coulage du second quai, des plates-formes de dépassement permettant d'échapper l'atelier d'application ont été réalisées.

Pour des raisons de confinement liées directement à la mise en œuvre de béton dans un tunnel (photo 4) l'ensemble des équipements neufs utilisant des moteurs thermiques respecte la réglementation TIR 3 (matériel américain – machine à coffrage glissant) et Euro 4 (matériel européen – camion benne – plate-forme de retournement – plate-forme de croisement – plate-forme de dépassement).

Le radier, à dévers variable, d'épaisseur moyenne 60 cm pour une largeur de 5,60 m (photo 5), intègre



Photo 5
 Vue générale du radier
 General view of the invert



Photo 6
 Centrale de fabrication des bétons
 Concrete mixing plant

Des solutions routières pour l'aménagement d'un tunnel ferroviaire

Photo 7
Rabotage
Planing



Photo 10
Quai haut
High quay

Photo 8
Coulage
caniveau à fente
Slotted
gutter casting



Photo 9
Semelle
quai haut
Footing
of high quay



un réseau d'évacuation de produits dangereux équipé de siphons répartis tous les 50 m et un réseau de drainage.

Pendant 11 semaines, quatre équipes se sont relayées pour assurer 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 le fonctionnement de l'atelier. Sur cette période, plus de 48 000 m³ de béton ont été approvisionnés à partir d'une centrale mobile de capacité 75 m³/h montée sur l'aire de fabrication attenante au chantier (photo 6). L'efficacité des techniques employées a maximisé les rendements dépassant les 800 m³ sur deux postes de 12 heures.

Différents profils en béton extrudé dont deux de caniveaux à fente, un pour le quai bas et deux pour le quai haut, ont été utilisés pour réaliser les quais.

Avant la mise en œuvre des bétons extrudés, des engravures ont été rabotées dans le radier au droit des zones de caniveau à fente qui sont exécutées avant le coulage des quais (photo 7).

Ces tronçons de caniveau à fente de diamètre 250 mm sont reliés par des siphons au réseau de produits dangereux. Ils ont pour vocation de collecter les liquides ruisselant des voies.

Le coulage du quai bas s'est fait en une passe. Le moule a permis d'avaloir à l'avancement le tuyau de drainage en place (diamètre 250 mm), ainsi que quatre fourreaux de diamètre 160 mm, pour la pose des futurs réseaux électriques (photo 8).

Le quai haut, côté rameaux, a été coulé en deux parties : une première (450 l/ml) concernant la semelle inférieure et une seconde (700 l/ml) permettant d'avaloir à

l'avancement une canalisation incendie et de réaliser deux caniveaux en U qui serviront de galeries techniques séparées (photo 9).

L'ensemble des ouvrages liés aux quais représente un volume de béton de 28000 m³ fabriqué à partir d'une centrale mobile d'une capacité de 50 m³/h montée sur l'aire de fabrication. Le linéaire de chaque ouvrage est de 16800 ml.

L'efficacité des solutions retenues sur ce chantier a permis de diviser par deux le délai de réalisation de ces ouvrages (20 semaines au total). Ces techniques, notamment celle de l'approvisionnement par camions bennes, sont particulièrement adaptées aux chantiers urbains et périurbains pour lesquels les centrales peuvent être éloignées du site de creusement. ■

ABSTRACT

Use of highway engineering techniques for the development of a rail tunnel

Fr. Gratessolle

For development work on the Perthus rail tunnel, Eiffage Travaux Publics, through its subsidiary Appia Grands Travaux, proposed to the TP Ferro consortium a plan to use highway engineering techniques for construction of the invert supporting the tracks and quays for evacuation of passengers and routing of technical systems.

The project involves developing a rail tunnel consisting of two tubes of diameter 9.20 m connected by cross-passages every 200 m.

An invert is to be poured for laying the railway track. A quay is to be executed on either side. On the cross-passage side, it will allow evacuation of personnel and the installation of miscellaneous electric cables (high quay); on the outer side (low quay) will be buried the ducts for routing of technical systems.

RESUMEN ESPAÑOL

Soluciones viales para la ordenación de un túnel ferroviario

Fr. Gratessolle

En el marco de la ordenación del túnel ferroviario de Le Perthus, Eiffage Travaux Publics, por mediación de su filial Appia Grands Travaux ha propuesto a la agrupación TP Ferro un proyecto en que aplica diversas técnicas viales para la realización de la solera de soporte de las vías y de los andenes que permiten la evacuación de los viajeros y el paso de las redes técnicas.

El proyecto consiste en la ejecución de un túnel ferroviario formado por dos tubos de 9,20 metros de diámetro conectados por ramales cada 200 metros. Una solera se debe aplicar para el tendido de la vía férrea. Por ambas partes se debe realizar un andén. Por el lado ramal, deberá permitir la evacuación del personal y la implantación de diversos cables eléctricos (andén superior); lado exterior (anden bajo), se enterrarán los manguitos de paso para redes técnicas.

Un tunnel ferroviaire

Le tunnel de Trofa, au nord du Portugal, d'une longueur de 1519 m s'insère dans le projet de réhabilitation et déviation vers le centre-ville du réseau ferroviaire, afin d'améliorer la liaison avec la ville de Porto.

Mille quatre-vingt-dix mètres sont construits en souterrain, et 429 m en construction traditionnelle (galeries recouvertes – murs de soutènement – talus). La méthodologie d'excavation comprend l'utilisation de moyens mécaniques (attaque ponctuelle et pelle hydraulique avec fraise et BRH) pour traverser un massif schisteux de moyenne qualité.

Le contrat a été remis le 29 janvier 2008, aux entreprises Soares da Costa et Spie batignolles europe, pour une durée de deux ans et un montant de 15726000,00 euros.

■ Présentation - Contrat

Le projet du tunnel ferroviaire de Trofa, ville portugaise située au nord de Porto, s'inscrit dans le cadre de l'extension du métro de Porto jusqu'à Trofa.

REFER, entité responsable du développement et de l'entretien du réseau ferroviaire du Portugal, doit créer une nouvelle ligne alternative à la ligne existante entre Porto et Trofa. Ainsi libérée, cette dernière va être aménagée, par le concessionnaire du métro de Porto, en nouvelle ligne de liaison entre les deux villes. La station existante sera désaffectée et reconstruite sur un nouvel emplacement situé à la jonction des deux lignes, facilitant ainsi les correspondances des passagers.

REFER a confié, le 29 janvier 2008, à Spie batignolles

europe, en partenariat avec la société portugaise Soares da Costa, la conception et la construction d'un tronçon de 1519 m de cette variante ferroviaire, en double voie.

Le délai global est de 730 jours pour un montant des travaux de 15726000 euros. Ce contrat sera réalisé au sein d'un groupement d'entreprises en gestion intégrée liant les deux entreprises adjudicataires.

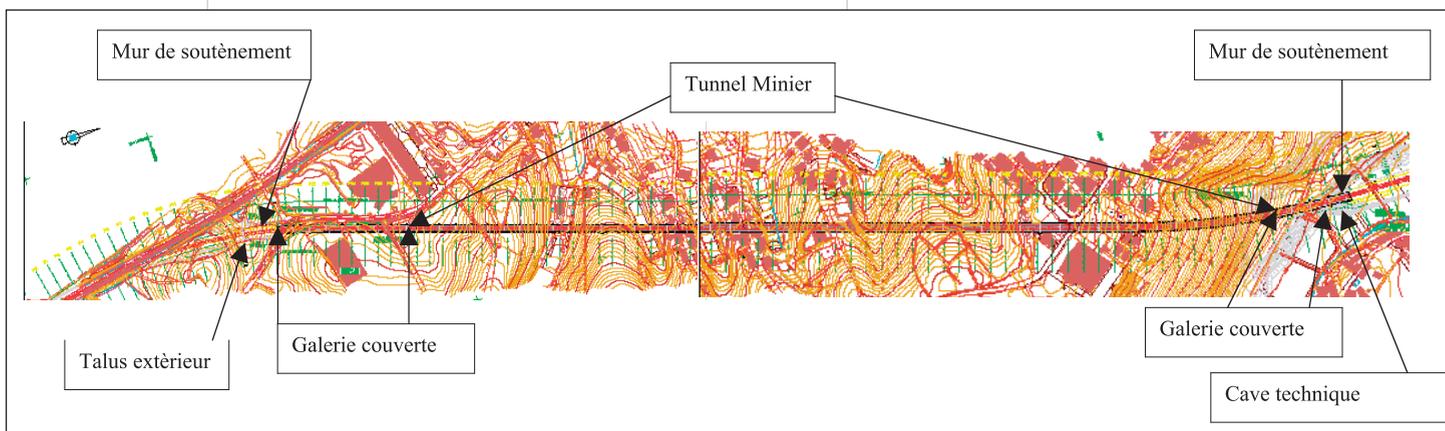
Le marché est à prix forfaitaire, sur la base des données prévisionnelles de géologie. La présence sur le chantier du bureau d'études, concepteur du projet d'exécution, permet, entre autres, d'optimiser le type de soutènement à mettre en place en fonction de la géologie, créant ainsi une dynamique d'accompagnement continue durant l'excavation du tunnel.

■ Descriptif (figure 1)

Ce projet qui s'étend du sud vers le nord est constitué par les principales structures et équipements suivants :

- deux murs de soutènement, côté ouest jusqu'à 10 m de hauteur, à chaque extrémité (62 m au sud et 53 m au nord);
- un talus renforcé, côté est (62 m au sud);
- un local technique pour un poste de transformation électrique, avec rampe d'accès au réseau routier, côté est (étendu sur 53 m au nord);
- un passage hydraulique (\varnothing 1 m), transversal côté sud;
- deux galeries couvertes (218 m au sud et 96 m au nord);
- un tunnel en souterrain de 1090 m;
- un système de drainage et d'imperméabilisation;
- l'installation d'équipements électromécaniques, du réseau d'incendie et de clôture.

Figure 1
Tracé général
General
alignment



au nord du Portugal



Antonio Silva
Directeur de production
Spie batignolles europe



Lúcia Brandão
Directrice technique
Spie batignolles europe



Luís Silva
Bureau d'études
Cenorgeo

Classes rochosas	Alteração	Fracturação	γ (kN/m ³)	K (m/s)	RMR	GSI
RC1	W ₂₋₃	F ₃₋₄	27	$\leq 10^6$	46 a 56	35 a 45
RC2	W ₂₋₃	F ₄₋₅	26,5	10^6 e 10^5	33 a 44	25 a 30
RC3	W ₃₋₄ a W ₅	F ₄₋₅ (zonas de falhas)	26	10^6 e 10^5	20 a 26	10 a 20

Tableau I
Classification géologique du massif rocheux
Geological classification of the rock mass

■ Géologie (figure 2)

Le tunnel traverse des roches métamorphiques très anciennes (Silurien de l'ère primaire, soit - 400 à - 420 millions d'années). Cette formation de Sobrado « grauwaques de Sobrado » forme un vaste sillon plissé (synclinarium) orienté NW-SE au nord de la ville de Porto (voir carte géologique 1/200000 Folha 1 de 1992).

L'excavation se fera exclusivement dans la formation (S₀) composée de phyllites (schistes sériciteux) et de grauwaques ou psammites (roche sédimentaire détritico-gréseuse) à délitage en plaquettes.

La caractéristique principale de ce massif est la tectonisation intense de la région; c'est donc la fracturation qui conditionne l'état et le comportement du terrain. Comme nous l'avons signalé, la tectonique joue ici un rôle majeur. D'ailleurs la géologie du tracé est découpée en deux blocs tectoniques, avec une inversion de la schistosité au niveau de la faille F7 (PK 1+215). Le tracé est recoupé par dix failles reconnues; avec des failles régionales de directions WSW-ENE (F1, F2, F3, F8, F9 & F10), WNW-ESE (F4, F5 & F6) et une faille N-S (F4) plus proche des alignements des failles majeures du nord du Portugal.

La classification géomécanique du massif rocheux traversé par le tunnel a été élaborée sur la base des valeurs de RMR (Bieniawski, 1989) et de GSI (Hoek, 2002). Trois classes de rocher ont été identifiées, désignées par RC1 (massif de qualité raisonnable pour 40 % du linéaire), RC2 (massif de raisonnable à faible qualité

pour 50 %) et RC3 (massif de faible à très faible qualité pour les 10 % restants), qui correspondent à trois horizons géotechniques.

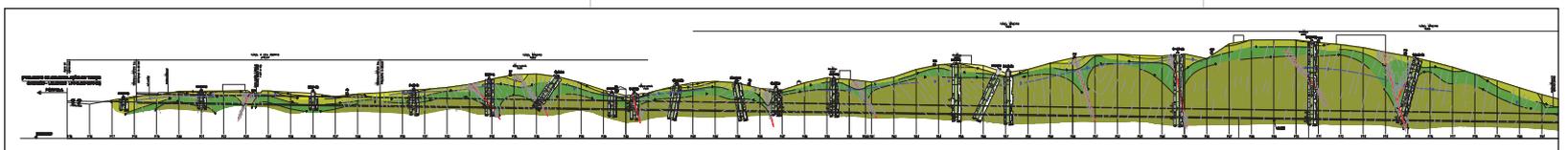
La classification du massif rocheux de référence pour le marché est reportée sur le tableau I.

Il est prévu que le tunnel traverse 790 m de terrain de type RC1, 180 m de type RC2 et 120 m de type RC3.



Photo 1
Attaque d'excavation du front nord
North face excavation drilling

Figure 2
Coupe géologique
Geological cross section



Un tunnel ferroviaire au nord du Portugal

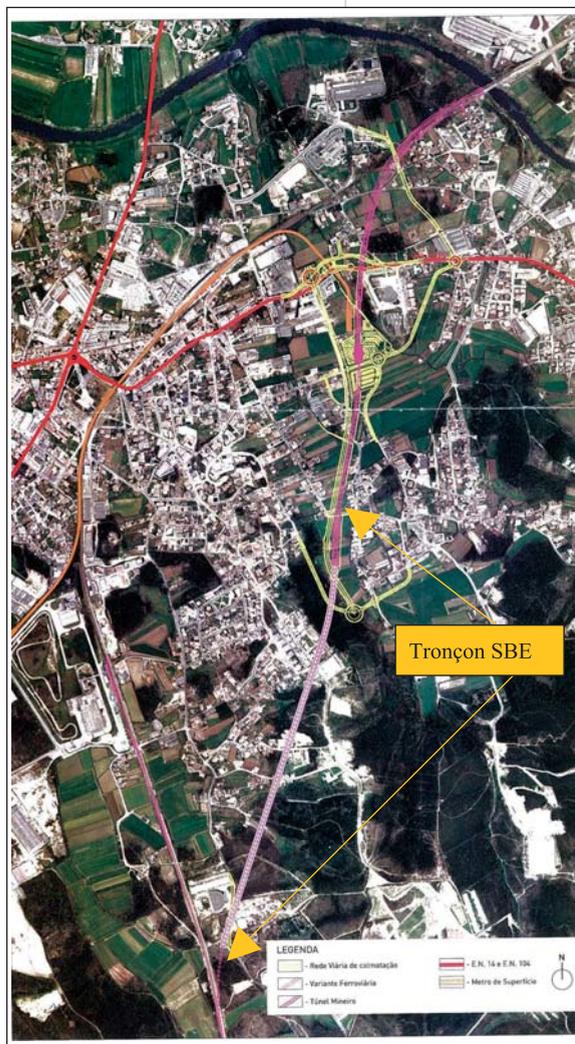
Photo 2

Eickhoff ET
450Q
Eickhoff ET
450Q machine

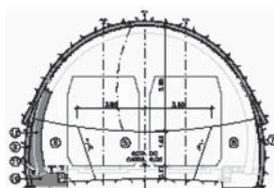


Figure 3

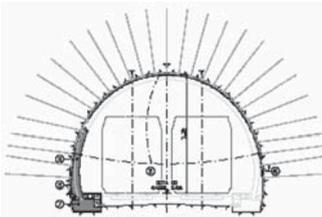
Vue d'ensemble
General view



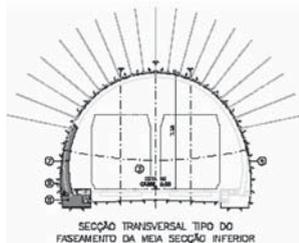
Sections types du tunnel



RP3 (avec ou sans voûte parapluie)



RP2



RP1

■ Nature des travaux - Moyens généraux (figure 3)

Le tunnel, long de 1090 m, est rectiligne sur 950 m puis en courbe, rayon de 1000 m sur 140 m. Sa pente de 1,4 % est constante sur toute sa longueur, et offre une plate-forme ferroviaire de largeur 10,50 m. Des niches de service bilatérales sont prévues tous les 25 m. Les travaux comprennent, entre autres, l'excavation souterraine du tunnel par la méthode NATM avec deux fronts d'attaques (têtes nord et sud) :

- la section pleine de 90 m² est excavée en deux fois : du fait de la nature schisteuse des matériaux, la demi-section supérieure de 58 m², au front sud par une pelleuse hydraulique CAT 325C CR (photo 1) équipée d'une fraise (160 kW), d'un marteau (1,5 t), et d'un godet; et au front nord par une haveuse électrique Eickhoff ET 450Q (photo 2) équipée d'une fraise de 300 kW et d'un convoyeur d'extraction des déblais.

La demi-section inférieure de 32 m² sera excavée, après l'ouverture totale de la demi-section supérieure, à partir du front nord, par une haveuse Eickhoff sur le couloir central, et par une pelle hydraulique pour les côtés et les piédroits latéraux;

- le marinage est effectué au moyen de camions et chargeuse de 4 m³ au sud, et par le convoyeur de la haveuse au nord;

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Déblais en tranchée ouverte : 98 100 m³
- Remblais en tranchée ouverte : 34 000 m³
- Déblais en souterrain : 57 869 m³
- Tube métallique diamètre 90 mm en voûte parapluie : 5 160 ml
- Injection de traitement de voûte parapluie : 3 280 m³
- Cintres métalliques réticulés (4 barres diamètre 20) : 2 544 ml
- Boulons expansifs d'ancrage (Swellex type Mn12) : 30 000 m
- Béton projeté : 5 780 m³
- Fibres métalliques : 173 400 kg
- Étanchéité : 32 574 m²
- Armatures : 174 798 kg
- Coffrage : 36 440 m²
- Béton type C25/30 : 22 500 m³

- le soutènement est constitué :
 - > par des voûtes parapluie (photo 3) et des cintres réticulés métalliques (section RP3) aux entrées (sur 30 ml pour chaque tête du tunnel) et en zone de faible couverture (3 m); située à 180 m de la tête sud celle-ci s'étend sur environ 30 m;
 - > de boulons expansifs type Swellex de 4 m, et de béton projeté armé fibré en section courante.

Le revêtement primaire (RP) est réparti selon la classification géologique, et les épaisseurs de béton projeté varient selon les zones. Un mini-pantofore à un bras met en œuvre les boulons d'ancrage Swellex sur le front sud, tandis que le pantofore à deux bras plus nacelle installe les tubes de voûte ainsi que les Swellex sur l'autre front.

Le démarrage des fronts a été décalé pour permettre la rotation des jumbos qui exécutent les voûtes parapluie. Deux robots Aliva PM407 sont mobilisés pour les opérations de béton projeté.

La ventilation durant l'excavation est assurée par des ventilateurs soufflants à chaque tête, et un dépoussiéreur en retrait de la haveuse électrique.

Un système de suivi des tassements et des déformations est installé le long de l'ouvrage, afin de détecter toute anomalie à l'avancement de l'excavation. Il comprend :

- la mise en œuvre en souterrain de sections de convergence tous les 20 m;



- la mise en place de repères, tous les 25 m, au bord des talus des tranchées ouvertes;
 - le scellage d'extensomètre aux têtes du tunnel et en zone de faible couverture;
 - l'implantation de piézomètre le long de l'ouvrage;
- Les lectures sont journalières près des fronts, et plus espacées en aval.

Les compléments en galerie couverte de part et d'autre du tunnel minier, qui comptabilisent 314 m de la lon-

Photo 3
Deuxième voûte parapluie au front sud
Second umbrella arch on the South face

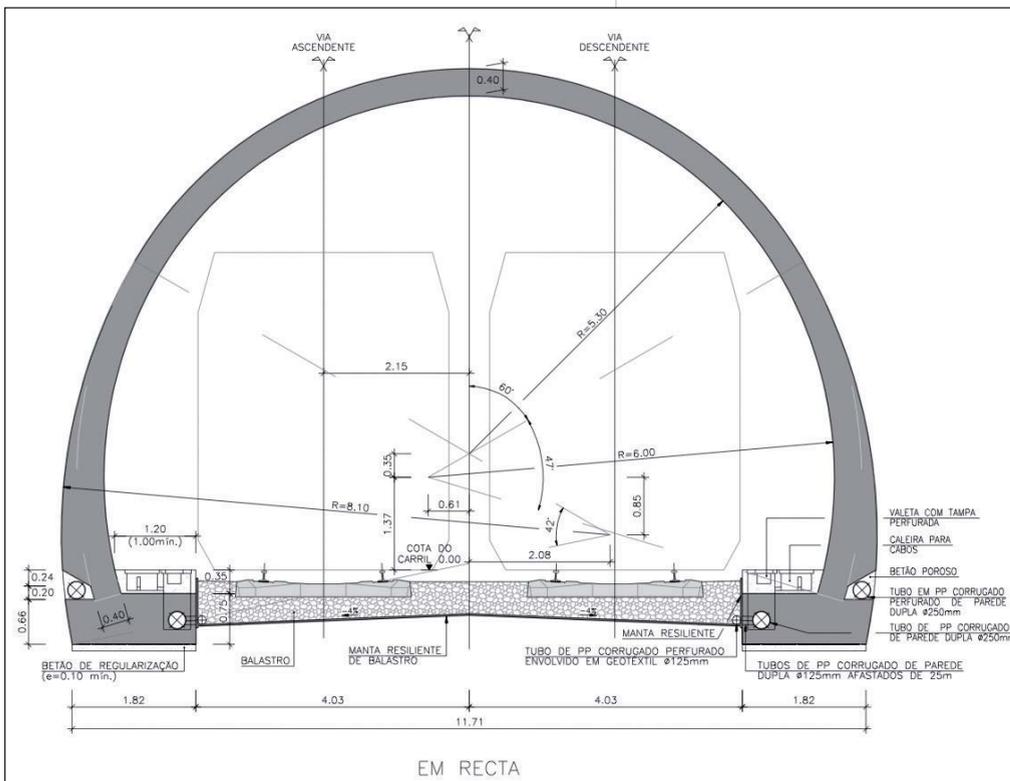


Figure 4
Section type achevée du tunnel
Completed typical cross section of the tunnel

Un tunnel ferroviaire au nord du Portugal



Photo 4

Front nord : installations, tranchée ouverte et tête du tunnel

North face : plant, open-cut excavation and tunnel portal



Photo 5

Tranchée ouverte au front sud (fin de la première phase)

Open-cut excavation on the South face (end of Phase One)



gueur du projet, ont été excavés en tranchée ouverte avec soutènement des talus provisoires par ancrages (4 à 8 m de longueur) d'acier nervuré injectés et reliés par treillis soudé entre les deux couches de béton projeté (photos 4 et 5).

Le revêtement béton armé des voûtes sera mis en place à l'aide d'un coffrage métallique autoportant d'une longueur de 12,50 m, équipé d'un jeu de panneaux indépendants pour la réalisation des amorces en semelles, d'un système complémentaire autoportant pour les piédroits en faux tunnel et d'un échafaudage mobile indépendant pour le montage des armatures passives. Près de 120 utilisations sont programmées pour exécuter le revêtement définitif du tunnel avec un cycle de 2,5 jours en faux tunnel et d'un jour en tunnel minier.

Les autres travaux comprennent :

- à l'avancement et avant le bétonnage du revêtement l'installation d'une membrane d'étanchéité et des armatures en souterrains;
- en retrait du béton en faux tunnel, du réseau de drainage, avec la particularité d'un drain installé en pied de voûte entre le support primaire et le revêtement définitif relié transversalement au drain des deux voies.

Les travaux annexes extérieurs (murs, talus, remblais) seront réalisés en parallèle de l'exécution du tunnel et de son revêtement.

Les équipements et réseaux électromécaniques et incendie seront installés en phase finale du chantier.

■ Avancement

Fin juin 2008, les travaux d'excavation souterraine enregistraient une longueur excavée de 56 m au front nord et 18 m au front sud.

L'excavation en tranchée ouverte est terminée à 75 %. Les travaux de semelles de voûte et des murs ont débuté en juillet-août, en conformité avec le planning des travaux.

Les déformations et les tassements enregistrés jusqu'à présent correspondent aux valeurs prévues par le projet (13 mm maxi en corde, et 1 mm pour les tassements).

■ Qualité - Sécurité Environnement

Le système de gestion de la qualité mis en place sur le chantier, selon les procédures de Spie batignolles europe, a été approuvé et adopté par le client, situation peu habituelle au Portugal, où souvent l'entrepreneur doit s'adapter au système global du maître d'ouvrage, voire parfois à celui du maître d'œuvre.

Le chantier étant proche de routes municipales, un ensemble de signalisation routière provisoire a été mis en place, ainsi qu'une barrière en béton le long des tranchées ouvertes adjacentes aux voies de circulation. Les remblais des galeries ouvertes seront réalisés en utilisant les matériaux issus de l'excavation. Les excédents de terre seront transportés en décharges licenciées ou seront réutilisés par des entrepreneurs locaux possédant un permis de remblais délivré par la mairie de Trofa.

À la sortie des pistes des fronts nord et sud, les camions et autres véhicules sont contraints de passer au lave-roues accessible pour éviter de souiller les routes locales. En période de forte chaleur les pistes d'accès sont arrosées de manière à limiter les poussières et par là même la gêne aux riverains.

Les eaux usées sont acheminées vers des bassins de décantation et des mini-cuves d'hydrocarbures dont l'enlèvement est assuré par des sociétés agréées. ■

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

REFER E.P.

Maître d'œuvre

DHV

GEG (Assistance technique du maître d'ouvrage)

Entrepreneur - Concepteur

Consortium Soares da Costa Spie batignolles europe

Sous-traitants et prestataires

- Bureau d'études : Cenorgeo
- Terrassements : JADP Lda
- Soutènement de talus : Comasa
- Soutènement : Duromin (tubes et accessoires de perforation pour les voûtes parapluie) - Macotécnica (cintres réticulés) - Atlas Copco (Swelllex)
- Béton et adjuvants : Qualibetão - BASF
- Contrôle de béton : APEB - Civitest - Qualibetão
- Armatures : Serdaço
- Coffrage : Péri

ABSTRACT

A rail tunnel in northern Portugal

A. Silva, L. Brandão, L. Silva

The 1519-metre long Trofa tunnel, in northern Portugal, forms part of the project for railway network renovation and diversion toward the city centre, to improve the link with the city of Oporto.

There are 1090 metres of underground construction and 429 m of traditional construction (covered galleries, retaining walls, earth banks). The excavation methodology involves the use of mechanical equipment (partial-face TBM and hydraulic shovel with cutter and hydraulic rock breaker) to pass through a shaly rock mass of mediocre quality.

The contract, awarded on 29 January 2008 to the contractors Soares da Costa and Spie batignolles europe, is worth 15,726,000 euros over a period of two years.

RESUMEN ESPAÑOL

Un túnel ferroviario al norte de Portugal

A. Silva, L. Brandão y L. Silva

El túnel de Trofa, al norte de Portugal, de una longitud de 1519 metros se integra en el proyecto de rehabilitación y variante hacia el centro urbano de la red ferroviaria, con objeto de mejorar el enlace con la ciudad de Porto.

Mil cuatrocientos diez metros se han construidos en subterráneo, y 429 metros en construcción tradicional (galerías recubiertas – muros de contención – taludes).

La metodología de excavación incluye la utilización de medios mecánicos (ataque puntual y pala hidráulica con fresa y BRH) para atravesar un macizo formado por esquisto de calidad media.

El contrato se ha adjudicado el 29 de enero de 2008, a las empresas Soares da Costa y Spie batignolles europe, para una duración de dos años y un importe de 15726000,00 euros.

Construction du collecteur

Une prouesse technique à

Dans le cadre de la restructuration du réseau d'assainissement de Vaulx-en-Velin, CSM Bessac vient de réaliser le creusement du collecteur « Carré de Soie », pour le compte de la Communauté urbaine du Grand Lyon.

L'ouvrage, de 2 m de diamètre, a été réalisé par fonçage horizontal à l'aide du plus gros microtunnelier utilisé à ce jour en France.

La performance réside également dans la longueur de l'ouvrage (966 m), foncé en un seul tronçon. Il s'agit, là aussi, d'une première en France.

■ Contexte général du projet

La Communauté urbaine du Grand Lyon a lancé le projet de restructuration du réseau d'assainissement principal de Vaulx-en-Velin (Rhône), qui s'inscrit dans le programme d'assainissement du bassin versant de l'Émissaire de la Plaine de l'Est (EPE).

À l'heure actuelle, l'EPE fonctionne uniquement par temps de pluie et reprend les trop-pleins des collecteurs d'assainissement unitaires desservant les communes de Vaulx-en-Velin, Décines-Charpieu, Bron, Saint-Priest, Chassieu et, hors communauté, Genas, Saint-Laurent-de-Mure et Saint-Bonnet-de-Mure. À terme, avec la mise en place de la station d'épuration de La Feyssine (mise en service prévue en 2011), il permettra de drainer l'ensemble des eaux usées de ces communes vers ce site de traitement.

Le réseau d'assainissement existant devait être optimisé

pour répondre aux contraintes du site : préservation du milieu naturel face aux débordements intempestifs des déversoirs d'orage, prise en compte de l'urbanisation future, limitation du risque d'inondation, limitation de la mise en charge des collecteurs...

Le projet repose sur l'augmentation de la capacité des collecteurs existants, sur le réglage des conditions de fonctionnement des déversoirs d'orage et sur la mise en place d'un nouveau collecteur structurant de près d'un kilomètre de longueur et de 2 m de diamètre intérieur, se raccordant à l'aval sur l'EPE.

■ Le collecteur « Carré de Soie »

Les principales caractéristiques de cet ouvrage sont :

- diamètre intérieur de 2000 mm;
- longueur de 966 m;
- pente constante de 5 mm/m;
- tracé comportant deux courbes (figure 1);
- profondeur comprise entre 6,40 et 10,65 m de l'amont vers l'aval;
- deux croisements des voies du tramway LEA.

En plus du collecteur proprement dit, les travaux comprennent la réalisation d'un puits amont, d'un puits aval de raccordement sur l'EPE, de trois regards intermédiaires d'accès et de quatre cheminées d'aération.

Concernant le contexte géotechnique des travaux, le collecteur est entièrement inscrit dans les alluvions sablo-graveleuses compactes du Rhône. Ces graves peuvent renfermer des blocs erratiques. Leur perméabilité est de l'ordre de 10^{-4} m/s.

Figure 1

Vue en plan du tracé du collecteur

Plan view of the main sewer layout



Tracé de l'ouvrage

« Carré de Soie » (Grand Lyon) Vaulx-en-Velin



Yann Rouillard
Ingénieur d'affaires
CSM Bessac

L'ensemble du collecteur est calé au-dessus de la nappe phréatique, seules des infiltrations ponctuelles sont possibles.

Le secteur sur lequel est construit ce nouveau collecteur se situe en plein cœur du projet urbain « Carré de Soie ». Dans ce secteur en pleine mutation, il était donc nécessaire de limiter au maximum les impacts et les perturbations en surface : présence de l'avenue des Canuts qui dessert la nouvelle station de métro « La Soie », présence de lignes de bus, présence de la ligne de tramway LEA... Il était par conséquent impossible d'envisager une réalisation en tranchée ouverte qui entraînerait la fermeture, pendant plus d'un an, de l'avenue des Canuts.

Compte tenu des contraintes du projet (croisements des voies du tramway LEA, voiries fréquentées, site urbain, forte profondeur, limitation maximale des tassements...), la Communauté urbaine du Grand Lyon a lancé un appel d'offres sur la base d'un creusement du collecteur au tunnelier à confinement. Le revêtement en béton armé du collecteur pouvait être soit circulaire Ø 2000, soit de section hydraulique équivalente avec une hauteur minimale de 1,80 m.

■ Solution technique retenue

Entre la solution de base et les diverses variantes proposées par les entreprises, la Communauté urbaine du Grand Lyon a retenu la solution variante présentée par CSM Bessac.

Cette solution consiste à utiliser un microtunnelier associé à un revêtement par tuyau de fonçage en béton armé. Elle met à profit les dernières évolutions dans le domaine du creusement mécanisé au microtunnelier, en terme :

- de longueur de tunnel réalisé en un seul tronçon sans puits intermédiaire : un ouvrage de 966 m constitue un record en France ;
- de diamètre d'ouvrage : un diamètre de 2 m est une première en France ;
- de technique de guidage en courbe : jusqu'à R = 500 m sur ce projet.

En plus de son attrait économique, cette variante offrait également une réduction du délai d'exécution des travaux.

La réalisation d'un chantier aussi complexe requiert une très forte expertise. CSM Bessac possède ces compétences, grâce, notamment, aux retours d'expérience de plusieurs projets similaires en France et à l'étranger. L'entreprise, pionnière en France pour les fonçages courbes et le guidage par gyrocompas, a déjà réalisé plusieurs fonçages de longue distance et de gros diamètre dont, à l'export, des ouvrages jusqu'à 1 300 m

de long pour des diamètres allant jusqu'à 2 750 mm. Cette expertise doit être complétée par une grosse capacité d'intervention sur des matériels sophistiqués. C'est grâce à son service technique de 45 personnes totalement dédié à la construction, aux réparations et à l'entretien des matériels spécifiques que CSM-Bessac offre cette forte réactivité qui contribue à la réussite d'un tel chantier.

■ Les puits

Compte tenu des emprises foncières disponibles dans le secteur, le puits d'attaque du tunnelier a dû être implanté à l'amont. Le creusement du collecteur au microtunnelier s'est donc fait en attaque descendante. Ce puits rectangulaire, peu profond, a été réalisé en palplanches métalliques vibrofoncées puis surbattues au mouton diesel. Après réalisation d'un radier en béton armé, le matériel de creusement au microtunnelier a pu être installé dans le puits (photo 1).

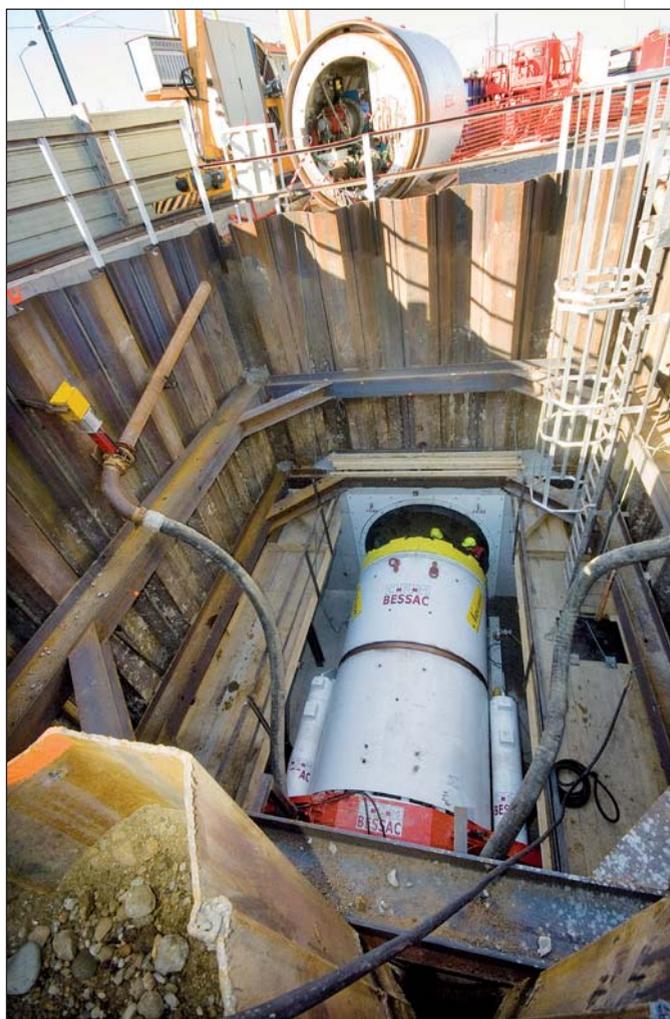


Photo 1
Puits d'attaque du tunnelier
Tunneller entry shaft

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Communauté urbaine du Grand Lyon

Maître d'œuvre

Communauté urbaine du Grand Lyon - Direction de l'Eau

Entreprise générale

CSM-Bessac

Construction du collecteur « Carré de Soie » (Grand-Lyon).
Une prouesse technique à Vaulx-en-Velin

Photo 2
Puits de sortie
Exit shaft

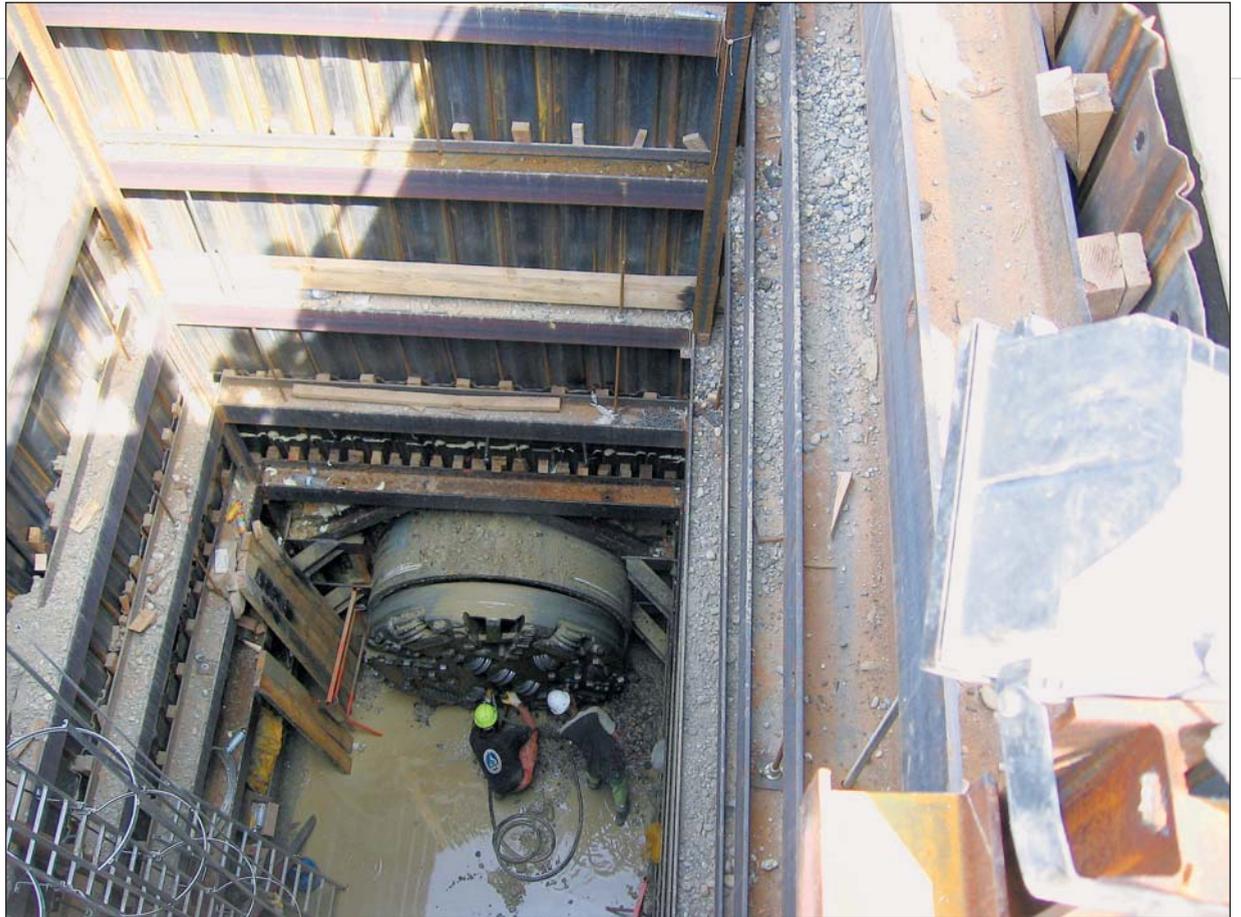
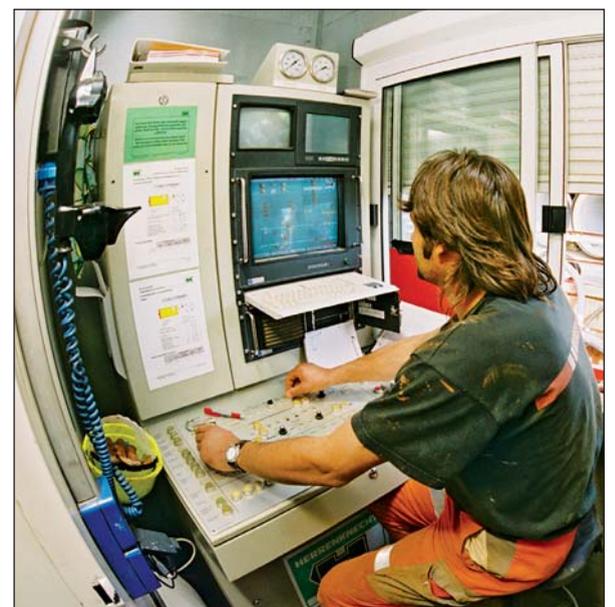


Photo 3
Microtunnelier en usine
Microtunnel boring machine in factory

Photo 4
Container de pilotage du microtunnelier
Microtunneller control container



Le puits aval de réception du tunnelier et de raccordement sur le collecteur EPE, beaucoup plus profond, a été excavé selon la technique traditionnelle avec mise en place au terrassement d'un soutènement provisoire en profilés et tôles métalliques (photo 2).

Les regards d'accès intermédiaires et les rameaux de raccordement sur le collecteur ont eux aussi été réalisés en technique traditionnelle.

La technique du forage vertical a été appliquée pour les quatre cheminées d'aération, axées sur le collecteur.

■ Le creusement du collecteur

Le tunnelier

Le tunnelier utilisé pour ce projet est de type Herrenknecht AVN. Il permet normalement la réalisation d'ouvrages de 1800 mm de diamètre intérieur.

CSM Bessac, propriétaire de ce matériel, a donc conçu et construit un kit élargisseur afin de lui permettre de réaliser ce collecteur de 2000 mm de diamètre intérieur. Une nouvelle roue de coupe a également été fabriquée pour tenir compte de ce nouveau diamètre. La conception de la roue a été adaptée à la géologie le long du tracé (photo 3).

Le tunnelier est constitué principalement de trois modules :

- la roue de coupe;
- le bouclier;
- le tube suiveur/power pack.

Le confinement du front de taille est assuré par une boue bentonitique maintenue sous pression. Cette boue sert également de fluide porteur pour l'évacuation des déblais par pompage (marinage hydraulique).

Le creusement

La particularité principale d'un microtunnelier, par rapport à un tunnelier, vient du fait qu'il est entièrement piloté à distance, à partir d'un container placé à l'extérieur du tunnel, à proximité du puits d'attaque.

Le pilote dispose sur son pupitre de tous les paramètres de fonctionnement et de guidage du tunnelier (photo 4). Seules des interventions de maintenance et de contrôle sont alors réalisées dans le tunnel.

Le terrain est abattu par les outils de la roue de coupe du tunnelier. Les déblais sont ensuite concassés dans la tête du tunnelier où ils sont mélangés avec la boue bentonitique.

Cette boue, chargée des déblais, est pompée en permanence durant le creusement par une série de pompes, d'un débit de 250 m³/h, montées en série dans le tunnel. Elle circule le long du tunnel dans des conduites Ø 150 mm, jusqu'à un système de séparation placé à proximité du puits d'attaque (photo 5). Plusieurs



Photo 5

Système de séparation des déblais

Excavated material separation system

Construction du collecteur « Carré de Soie » (Grand-Lyon). Une prouesse technique à Vaulx-en-Velin



étages de traitement (criblage, hydrocyclonage) permettent de séparer les déblais de la boue, qui est réinjectée dans le circuit fermé de marinage. La très bonne qualité des déblais sablo-graveleux issus du creusement a permis leur stockage temporaire à proximité du site des travaux, en vue d'une valorisation ultérieure dans le cadre d'un aménagement routier.

Le revêtement

La technique du microtunnelier fonctionne en association avec un revêtement par tuyaux en béton armé mis en place par fonçage (photos 6 et 7).

Les caractéristiques des tuyaux utilisés sont :

- diamètre intérieur : 2 000 mm ;
- épaisseur : 200 mm ;
- longueur : 3 000 mm ;
- béton : C60/75.

Avec cette technique de fonçage, c'est donc l'ensem-

ble collecteur + tunnelier qui avance en même temps dans le terrain, sous la poussée de vérins hydrauliques. La station principale de poussée, d'une capacité de 8 500 kN, est installée dans le puits d'attaque (photo 1). Afin de minimiser les efforts à appliquer pour faire progresser le tunnel et le tunnelier, un fluide de lubrification est injecté en permanence, à intervalles réguliers, entre l'extrados des tuyaux et le terrain, via des piquages prévus dans les tuyaux. L'ensemble est entièrement piloté par un automate : ouverture des vannes, débit, pression...

Malgré ces dispositions, les frottements latéraux appliqués par le terrain n'auraient pas permis de réaliser l'ensemble des 966 m du collecteur à l'aide de la seule station principale de poussée. Des stations intermédiaires de poussée ont donc également été intercalées régulièrement entre deux tuyaux consécutifs (tous les 100 m environ). Ces stations intermédiaires sont constituées de 16 vérins hydrauliques de 850 kN de poussée unitaire (figure 2). Le pilote faisait donc ainsi progresser le tunnel par tronçons successifs d'une centaine de mètres.

Le guidage

Afin de réaliser les deux courbes du tracé, de respectivement 700 et 500 m de rayon (photo 7), le tunnelier était équipé d'un système de guidage par gyrocompas. Celui-ci donnait en permanence au pilote la position du tunnelier par rapport au tracé théorique du collecteur. Une solution de guidage très performante qui a permis de respecter les tolérances contractuelles (10 cm en planimétrie et 5 cm en altimétrie). On connaît l'importance du respect du fil d'eau des collecteurs d'assainissement ; celui de cet ouvrage n'a pas varié de plus de 2 mm par rapport au fil d'eau théorique, et ceci sur la totalité des 966 m.

Le suivi des mouvements superficiels

Le collecteur est implanté quasi intégralement sous une voirie très fréquentée. Il croise, de plus, à deux reprises les voies du tramway LEA. La limitation maximale des mouvements superficiels (tassements et gonflements) constituait donc la contrainte majeure du projet.

Un suivi topographique conséquent a été mis en place durant les travaux :

- un dispositif de suivi topographique en temps réel pour les voies du tramway (théodolite motorisé) ;
- un suivi topographique conventionnel sur le reste du tracé.

Les mouvements mesurés, de l'ordre du millimètre, sont restés très inférieurs aux exigences contractuelles.

Photo 6

Installations de chantier et tuyaux de fonçage

Construction plant and jacking pipes



Photo 7

Collecteur en cours de creusement (avec courbe R = 500 m)

Main sewer during tunnel driving (with curve R = 500 m)



■ Synthèse

La réalisation du collecteur « Carré de Soie » par la technique du microtunnelier a été une réussite technique totale.

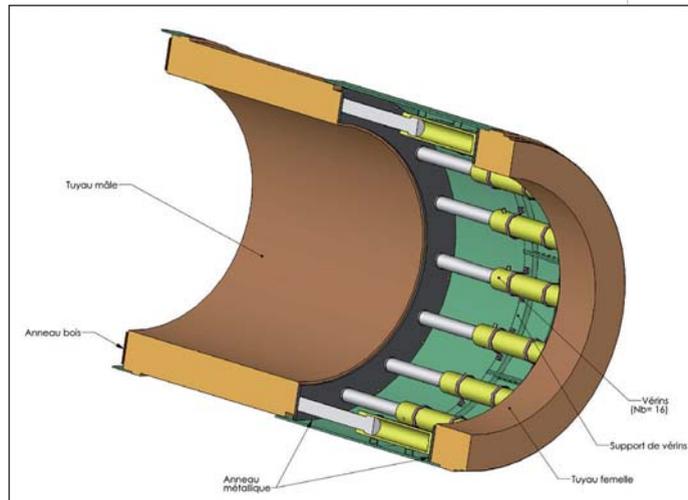
Le creusement du collecteur s'est effectué en 4 mois seulement, y compris la période de démarrage du tunnelier, sans créer de perturbations aux ouvrages environnants.

Ceci démontre la capacité de la technique du microtunnelier à être mise en œuvre pour des diamètres importants, des longueurs élevées et des tracés courbes. Néanmoins, la réussite de ces chantiers très techniques requiert de la part de l'entreprise des moyens humains et matériels importants, ainsi qu'une forte réactivité.

Le choix du maître d'ouvrage de retenir cette solution variante, particulièrement innovante, s'est avéré pleinement justifié.

■ L'entreprise

Le positionnement de CSM Bessac comme spécialiste toutes techniques dans le creusement de tunnels de 500 mm à 5 m de diamètre (une gamme adaptée aux ouvrages pour l'eau, l'assainissement et les galeries techniques) a permis à l'entreprise d'acquérir, ces der-



nières années, un volume important d'affaires faisant appel à la technique du microtunnelier.

Outre l'affaire de Lyon « Carré de Soie », qui représentait une première en France, l'entreprise toulousaine a réalisé plus d'une quinzaine de chantiers de microtunnelier ces trois dernières années.

Parmi ceux-ci, nous pouvons citer :

- l'émissaire de rejet en mer des Sables-d'Olonne (85) : 625 m Ø 1400 mm creusés sous l'océan dans des gneiss et des argiles avec une courbe en altimétrie;

Figure 2

Éclaté d'une station intermédiaire de poussée
Exploded view of an intermediate jacking station



Photo 8

Sortie du tunnelier dans le puits aval
Tunneller exit in the downstream shaft



Construction du collecteur « Carré de Soie » (Grand-Lyon). Une prouesse technique à Vaulx-en-Velin

- le collecteur EU d'Annemasse (74) : 360 m Ø 1200 mm : un tronçon avec trois courbes en planimétrie et une courbe en altimétrie ;
- le collecteur de Mazeau à Saint-Médard-en-Jalles (33) : 1150 m Ø 500 mm.

L'année 2009 sera également fructueuse en projets d'ouvrages souterrains réalisés au microtunnelier. Ainsi, CSM Bessac va démarrer au Havre, pour la Communauté urbaine, le creusement d'un collecteur de 1800 mm de diamètre et de près de 1000 m de longueur en un seul tronçon.

Un émissaire sous-marin à Rabat

La forte activité à l'export (50 % du chiffre d'affaires, dont en particulier 23 km de tunnels en cours de réalisation en Amérique du Sud et en Algérie à l'aide de quatre tunneliers à pression de terre) s'est enrichie par l'acquisition, à Rabat au Maroc, d'un émissaire sous-marin de 2 m de diamètre et long de 800 m, ainsi que d'un collecteur de 1000 m de longueur et 1600 mm de diamètre à Bogota en Colombie, tous les deux excavés au microtunnelier. ■

Une gamme complète

La technique du microtunnelier peut être mise en œuvre pour une large gamme de diamètres.

Cette technique requiert des investissements lourds pour équiper chaque chantier des matériels les plus performants. Outre le microtunnelier qui assure l'abattage du terrain, c'est toute une chaîne de matériels complexes qui doit être mise en œuvre : stations de poussée principale et intermédiaires, sas de transfert, module de puissance, pompes de transfert de déblais, systèmes de séparation des boues (dessableurs, hydrocyclones, filtres presses, centrifugeuses), système de guidage, plusieurs automates assurant le pilotage, le contrôle des stations de poussées, l'asservissement des vannes d'injections de lubrification...

CSM Bessac possède ainsi, sur son parc, les équipements qui permettent de couvrir toute la gamme de diamètres entre 500 mm et 2,50 m.

Aujourd'hui, la maîtrise de la technique du fonçage horizontal sur de grandes longueurs (avec des tracés pouvant présenter des courbes) associée aux performances croissantes des microtunneliers, permet aux entreprises spécialisées de proposer aux concepteurs des solutions de pose de réseaux sans tranchée, maîtrisées, économiques et qui limitent fortement le coût social des travaux ainsi que leur impact environnemental.

ABSTRACT

Construction of the "Carré de Soie" main sewer (Greater Lyons). A technical exploit in Vaulx-en-Velin

Y. Rouillard

As part of the restructuring of the Vaulx-en-Velin sewerage network, CSM Bessac has just completed driving the "Carré de Soie" main sewer, for Communauté urbaine du Grand Lyon (Greater Lyons authority). The structure, 2 m in diameter, was executed by horizontal boring with the largest microtunnel boring machine used in France to date.

Part of the feat is also due to the length of the structure (966 m), bored in a single section. Here again, this is a first in France.

RESUMEN ESPAÑOL

Construcción de un conducto de alcantarillado "Carré de Soie" (Gran-Lyón). Una hazaña técnica en Vaulx-en-Velin

Y. Rouillard

Situándose en el marco de la reestructuración de la red de saneamiento de Vaulx-en-Velin, CSM Bessac acaba de ejecutar la excavación del conducto de alcantarillado "Carré de Soie", por cuenta de la Mancomunidad urbana del Gran Lyon. La estructura, de un diámetro de 2 metros, se ha realizado por excavación horizontal mediante la microtuneladora más grande utilizada hasta la fecha en Francia.

La actuación también reside en la longitud de la obra (966 metros), que se ha excavado en un tramo único. Se trata, además, de una primicia en Francia.

Tunnel des Grands Goulets (Drôme)

Priorité à la sécurité

Jérôme Subit
Infrastructure
de Transports
ETDE

Laurène
de Beaulaincourt
Communication
ETDE

Le tunnel des Grands Goulets, creusé par Bouygues Travaux Publics à flanc de montagne dans le Vercors, a été mis en service fin juin 2008.

Mobilisant ses compétences en travaux publics de réseaux et génie électrique et thermique, ETDE, une filiale de Bouygues Construction, mandataire d'un groupement réunissant l'ensemble des compétences liées aux équipements (Clemessy, Seitha, SEE RP), a mis en place les équipements électriques, les dispositifs d'éclairage et de radiocommunication, les systèmes de ventilation et de protection contre l'incendie. Les équipements de sécurité et d'exploitation témoignent d'un souci permanent d'assurer le plus haut niveau de sécurité possible à cet ouvrage départemental autogéré.

■ Le plus gros chantier de TP sur une route départementale

Deux raisons majeures ont conduit le Conseil général de la Drôme à décider, en juin 2005, la construction du tunnel. D'une part, la sécurité des usagers : bien que régulièrement rénovée, modernisée et confortée, l'ancienne route de montagne des Goulets (RD 518), aménagée il y a 150 ans, est de plus en plus fréquemment victime d'importantes chutes de pierres qui bloquent ou emportent la chaussée. Par ailleurs, la route est inadaptée au gabarit de certains véhicules.

D'autre part, la réalisation d'un tunnel permet de désenclaver le Vercors, créant ainsi de nouvelles opportunités de développement économique et touristique. Au plus fort du trafic, la route accueille 2 500 véhicules par jour.

La portion la plus dangereuse de l'ancienne route, aujourd'hui définitivement fermée, est donc remplacée par un tunnel dit « des Grands Goulets ». Cette percée, le plus gros chantier de travaux publics de France jamais entrepris sur une route départementale, aura duré presque trois ans, entre 2005 et 2007.

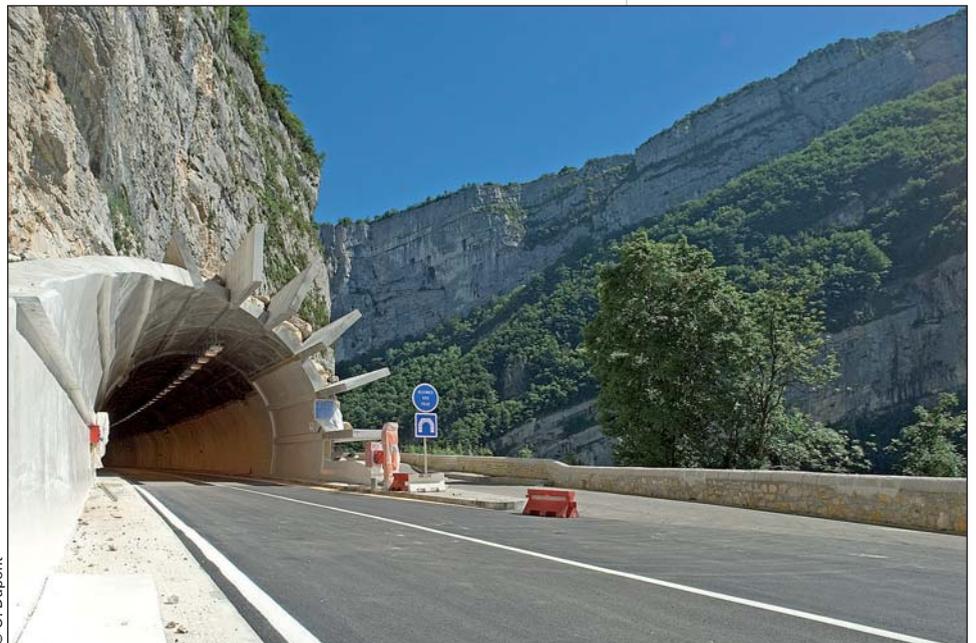
Outre de fortes contraintes environnementales liées au classement du site dans le parc naturel Natura 2000, le chantier s'est caractérisé par des délais très tendus. En effet, le planning prévisionnel des travaux d'équipements prévoyait 6 000 heures de travail et 12 mois de projet, mais seulement cinq mois de production avec un impératif de livraison fin juin 2008. Les délais ont été tenus malgré trois mois de fermeture de la tête aval du chantier suite à un éboulement en février.

Nécessitant l'intervention de plusieurs métiers avec

une grande variété de compétences, le chantier a bénéficié de la forte synergie entre les différents pôles d'activité d'ETDE (photo 1).

■ La sécurité au cœur du tunnel

Le tunnel des Grands Goulets, mis en service fin juin, a été creusé par Bouygues Travaux Publics, à une altitude d'environ 600 m.



© O. Dupont

À ce monotube bidirectionnel de 1 710 m de long avec un gabarit dégagé de 4,70 m de hauteur x 7 m de large, s'ajoutent six galeries de secours, creusées dans la roche, totalisant 850 m. Perpendiculaires au tube et longues de 50 à 250 m, ces six galeries (une tous les 250 m, soit plus que le minimum de 400 m exigé par la réglementation) débouchent sur l'ancienne route parallèle au tunnel et permettent une auto-évacuation des usagers en cas d'incident.

En termes de sécurité liée au génie civil, le tunnel dispose également de 16 niches de sécurité (une tous les 200 m) et d'un garage central avec une galerie de retournement. Ce tunnel forme un « S » abritant deux voies de circulation ouvertes aux poids lourds.

Les dispositifs de sécurité mis en œuvre vont bien au-delà des exigences fixées par les circulaires ministérielles pour une route départementale. Vingt-six postes d'appel d'urgence connectés à la gendarmerie jalonnent la galerie éclairée par 370 luminaires.

Répondant à une double volonté de faire durer les lampes et d'économiser l'énergie, le système module l'intensité de l'éclairage (réduite entre 23 heures et 6 heures par exemple).

Photo 1

Le tunnel des Grands Goulets, creusé par Bouygues Travaux Publics, a été mis en service fin juin 2008. Ici, tête aval du tunnel, côté Sainte-Eulalie

The Grands Goulets tunnel, driven by Bouygues Travaux Publics, was commissioned at the end of June 2008. Here, the downstream tunnel portal, Sainte-Eulalie end

Tunnel des Grands Goulets (Drôme). Priorité à la sécurité

Photo 2

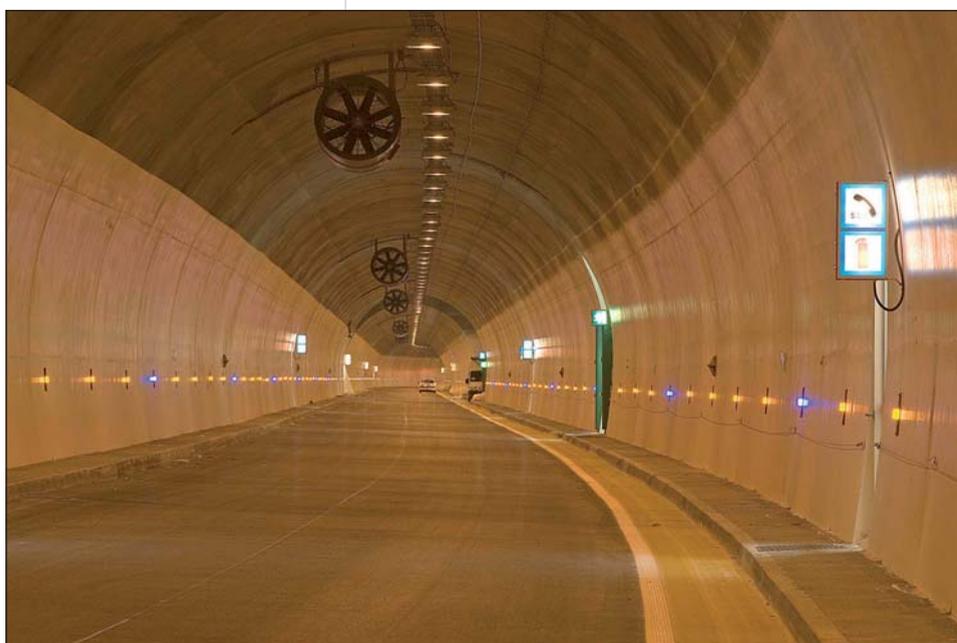
Les dispositifs de sécurité mis en œuvre vont bien au-delà des exigences fixées pour une départementale.

L'entrée de la galerie d'évacuation est signalée par des totems

The safety systems implemented go well beyond the requirements stipulated for a minor road. The evacuation gallery entrance is indicated by totems



© O. Dupont



© O. Dupont

Photo 3

Section type du tunnel, monotube bidirectionnel de 1 710 m de long, 4,70 m de hauteur et 7 m de large
Typical cross section of the tunnel, two-way single-tube, 1 710 m long, 4,70 m high and 7 m wide



Outre les 16 niches de sécurité, les 26 postes d'appel d'urgence, et les six galeries de secours, le tunnel est équipé d'un détecteur d'incendie tous les huit mètres, de plusieurs analyseurs d'atmosphère (opacité, monoxyde de carbone, monoxyde d'azote, etc.), de cinq accélérateurs de ventilation, d'un balisage à LED et de huit poteaux incendie. Les galeries de secours bénéficient d'un système de mise en surpression empêchant la pénétration des fumées (photos 2 et 3).

En termes d'exploitation, le tunnel est autogéré et ne dispose pas d'équipes d'intervention sur place. Tous les dysfonctionnements doivent donc être identifiés automatiquement avec un renvoi d'alarme vers les exploitants et la cellule de veille qualifiée du Conseil général.

Réparti en cinq lots techniques, le marché des systèmes de sécurité et d'exploitation représente 4,9 millions d'euros, dont 2,9 millions pour ETDE.

ETDE est intervenue en tant qu'ensemblier mandataire d'un groupement apte à gérer tous les aspects techniques. L'ensemble des équipements a été installé et mis en service dans un délai record de cinq mois. Mobilisant ses compétences dans les travaux publics de réseaux, le génie électrique et le génie thermique, ETDE a mis en place les équipements électriques, la gestion technique centralisée, les dispositifs d'éclairage et de radiocommunication, les systèmes de ventilation et de lutte contre l'incendie.

■ Équipements techniques sécurisés

Les solutions retenues en matière d'installations et d'exploitation mettent l'accent sur la sécurité. Les équipements sont répartis tout au long du tunnel et dans deux locaux techniques climatisés situés, l'un à la tête amont, l'autre au niveau du garage central. Une boucle réseau en fibre optique assure la communication entre les équipements de contrôle commande.

Électricité et éclairage : 1 500 points contrôlés

L'alimentation en électricité est assurée par deux postes HT (800 + 300 kVA) alimentés par deux artères distinctes et desservant chacune deux transformateurs à huile de 400 kVA. Deux onduleurs redondants assurent chacun 30 minutes d'autonomie. La distribution s'effectue à partir de deux TGTB, équipés de matériels ABB.

L'éclairage (70 candelas/m² en zone d'entrée) est assuré par 370 luminaires à vapeur de sodium haute pression,



© O. Dupont

Photo 4

Le tunnel est notamment sécurisé par six galeries de secours (une tous les 250 m), dotées de systèmes de mise en surpression empêchant la pénétration des fumées
Tunnel safety is ensured in particular by six emergency galleries (one every 250 m), equipped with overpressure systems preventing the ingress of fumes

dont certains équipés de ballasts bi-puissance (400 watts maximum) de façon à réduire la consommation lorsque les conditions de luminosité extérieure le permettent. Le système de gestion technique centralisée ne contrôle pas moins de 1500 points, l'ensemble étant alimenté en redondance par deux postes haute tension Areva de 400 kVA et de deux postes de 160 kVA complétés par une batterie d'onduleurs garantissant au moins une heure d'autonomie aux principaux équipements.

Aux entrées du tunnel est mis en œuvre un éclairage à contre-flux, commandé par des « luminancemètres ». Les luminaires sont alimentés par des câbles de sécurité CRIC1 résistant au feu et non propagateurs de flammes. Un luminaire sur trois est alimenté en courant ondulé.

Un balisage lumineux est assuré par des plots à LED 2 W encastrés dans les parois latérales du tunnel et complété par des panneaux lumineux de sécurité.

Les galeries de secours sont équipées de quelque 200 luminaires (photo 4).

Le projet d'installation électrique s'est étalé sur douze mois. Les derniers détails ont été réglés fin mai, avant l'exercice de sécurité civile du 11 juin qui a permis de vérifier le bon fonctionnement de tout le dispositif et notamment le déclenchement automatisé de l'alerte et de la fermeture du tunnel.

Au total, l'ouvrage est parcouru par 34 km de câble

courant fort, 24 km de câble courant faible (ou fibre optique) et 2 300 m de câble rayonnant assurant la liaison radio avec les pompiers et la gendarmerie.

Détection incendie

Elle est assurée par un câble doté d'un capteur tous les 8 m. Une alarme génère automatiquement l'envoi d'une alerte au SDIS (Service départemental d'incendie et de secours), au CORG (gendarmerie) et à la veille qualifiée du Conseil général. Les locaux techniques disposent de leur propre centrale de détection incendie avec renvoi des informations sur la GTC.

Radiocommunication et réseau d'appels d'urgence

Un câble rayonnant de 2 300 m installé tout au long de la voûte du tunnel permet les communications radio entre les services de secours. Vingt-six postes d'appel d'urgence sont installés dans les niches de sécurité et dans les galeries de secours.

Ventilation

La ventilation, ainsi que l'évacuation des fumées en cas d'incendie, tient compte du flux naturel. Cinq accélérateurs permettent une mise en surpression des galeries de secours.

Tunnel des Grands Goulets (Drôme). Priorité à la sécurité

▶ À l'entrée de ces galeries, sont disposés des coffrets abritant divers capteurs pour la mesure du CO, du NO, de l'opacité et de sens du flux d'air.

Gestion centralisée

Le système de contrôle commande de l'ensemble des équipements techniques, fondé sur des automates, regroupe 1 500 points de GTC.

L'installation favorise une protection intrinsèque des cheminements contre le feu en évitant au maximum les montages apparents lorsque c'est possible.

Contrat de maintenance

ETDE assure la maintenance des installations techniques du tunnel. Il s'agit d'un contrat pluriannuel de l'ordre de 300 000 euros, comprenant la fourniture des pièces détachées. Cette maintenance est assurée 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 avec astreinte et engagement d'intervention en moins de trois heures. Proche d'une « maintenance autoroutière », l'exécution du contrat est facilitée par la GTC du tunnel et une GMAO qui gèrent le fonctionnement des équipements, le planning des interventions, les plans de maintenance, etc.

Réalisation majeure pour la Drôme, et prouesse technique, cet ouvrage départemental autogéré et hyper sécurisé est une superbe réussite. Elle l'est pour le Conseil général de la Drôme, qui veut promouvoir un aménagement harmonieux et solidaire de son territoire, ainsi que pour Bouygues et le groupement piloté par ETDE, heureux d'avoir mené à bien un chantier très sensible en termes d'environnement et difficile techniquement. Bouygues a testé pour la première fois un système de dynamitage appelé Morse, plus efficace et moins dangereux que celui utilisé habituellement. Une avancée notable pour la sécurité des compagnons. En route vers d'autres tunnels! ■

ABSTRACT

Grands Goulets tunnel (Drôme region). Safety first

J. Subit, L. de Beaulaincourt

The Grands Goulets tunnel, driven by Bouygues Travaux Publics on a mountainside in the Vercors region, was commissioned at the end of June 2008.

Exploiting its competencies in public works for utilities networks and electrical and thermal engineering, ETDE, a subsidiary of Bouygues Construction company, leader of a consortium combining all equipment-related skills (Clemessy, Seitha, SEE RP), installed the electrical equipment, lighting and radiocommunication systems, and ventilation and fire protection systems. The safety and operating appurtenances show a constant concern for ensuring the highest possible safety level for this self-managed departmental tunnel.

RESUMEN ESPAÑOL

Túnel de Les Grands Goulets (Drôme). Prioridad a la seguridad

J. Subit y L. de Beaulaincourt

El túnel de Les Grands Goulets, cuya excavación se ha ejecutado por Bouygues Travaux Publics a media ladera en el Vercors, se ha puesto en servicio a finales de junio de 2008.

Mobilizando sus competencias en obras públicas de redes e ingeniería eléctrica y térmica, ETDE, un establecimiento de Bouygues Construction, mandatario de una agrupación que reúne la totalidad de las competencias vinculadas con los equipamientos (Clemessy, Seitha, SEE RP), implantó los equipamientos eléctricos, los dispositivos de alumbrado y de radiocomunicación, los sistemas de ventilación y de protección contra incendios. Los equipamientos de seguridad y de explotación atestiguan de un afán permanente de garantizar el más alto nivel de seguridad posible para esta estructura departamental cuya gestión va automatizada.