

# Travaux

OCTOBRE 2006

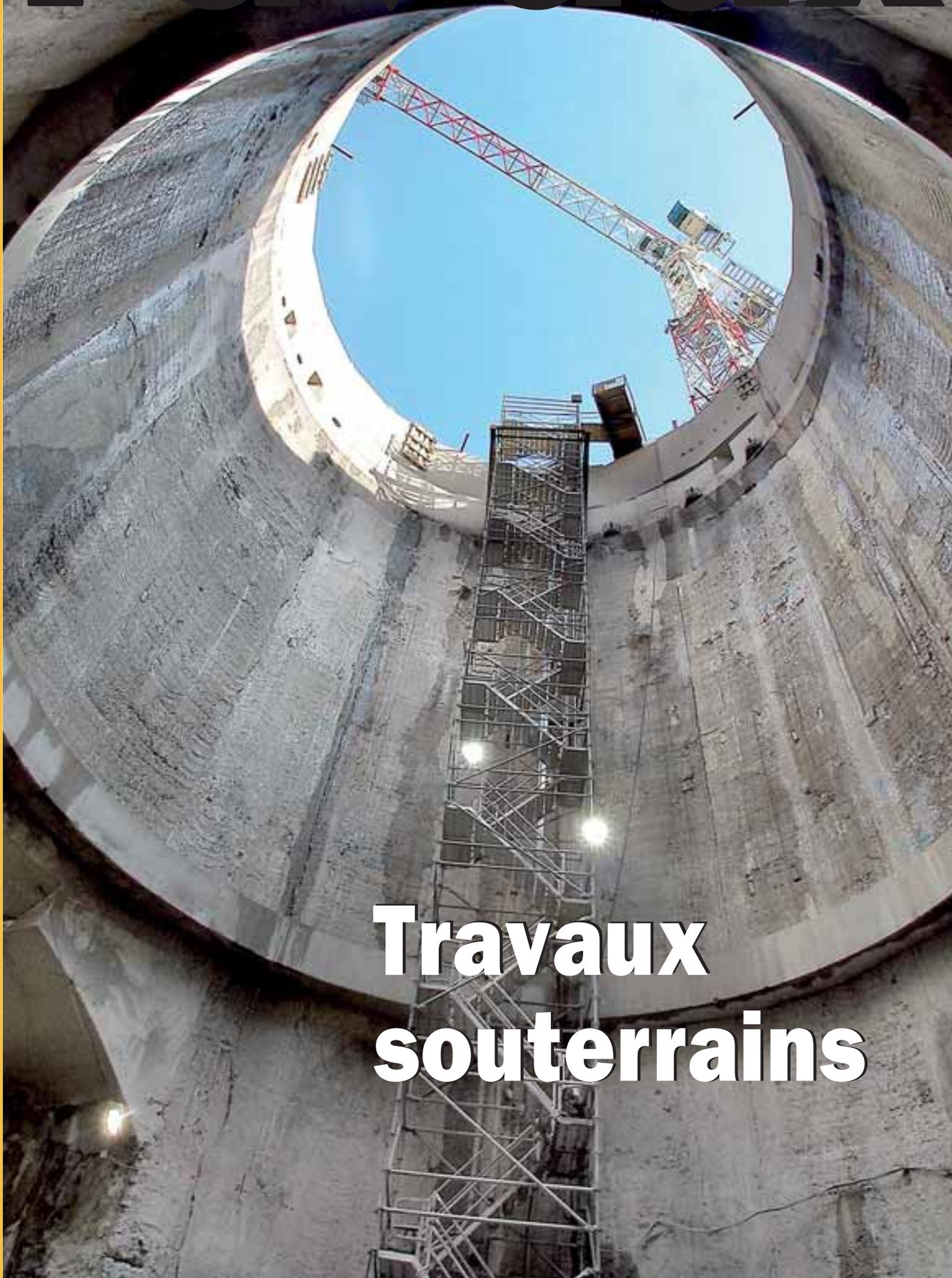
TRAVAUX SOUTERRAINS

TRAVAUX

**n° 834**

- Tunnel de base du Lötschberg : le lot de Mitholz
- Le tunnel de Ferden : ventilation et refroidissement
- L'institut Monégasque de Médecine du Sport
- La mine d'El Teniente au Chili
- Quatre chantiers en cours pour Campeon Bernard TP
- Couvertures du boulevard périphérique parisien
- Projet hydroélectrique de La Verna en Pyrénées-Atlantiques
- Sables d'Olonne : un tunnel sous-marin au microtunnelier
- Tunnel n° 1 de Porto. Avantages des détonateurs électroniques

N°834



## Travaux souterrains

Le présent numéro de la revue est dédié aux tunnels. Les articles témoignent de la grande diversité de l'activité des entreprises françaises en France et à l'international. Ce panorama vient compléter les publications déjà parues dans *Travaux* sur les grands projets réalisés ou en cours de réalisation en France, comme celui de l'A86 Ouest (juin 2005), les tunnels du Perthus et Maurice Lemaire (septembre 2005)...

L'année 2006 marque un tournant dans l'utilisation des tunneliers pour les tunnels routiers : un premier tronçon d'A86 sera ouvert au premier semestre 2007, alors que le tunnelier du Mont Sion sur l'A41 est en cours de montage.

Les méthodes traditionnelles continuent à progresser avec l'emploi d'explosif liquide au tunnel des Grands Goulets, ainsi que des essais, dans le même tunnel, de béton projeté fibré avec des fibres en polypropylène.

Les travaux liés à la mise aux normes des tunnels, en application des instructions 2000 et de la directive européenne, progressent. Les chantiers de rénovation des tunnels d'A8 seront tous actifs au premier semestre 2007. Maurice Lemaire continue sa mue après le percement des 7 km de galerie au tunnelier. La rénovation du tunnel du Parc des Princes vient d'être lancée en études et les autres opérations de la Ville de Paris et du SISER vont suivre.

De nombreuses autres villes se préoccupent de la "santé" de leurs tunnels à la suite de la mise en application de la loi SIST,

comme Lyon, où les projets de rénovation du tunnel de la Croix Rousse, des tranchées couvertes, ainsi que des tunnels du boulevard périphérique nord sont en cours.

Alors que les études des trois tunnels de l'autoroute A89 Est commencent sur le réseau ASF avec le tunnel de Violay qui sera le plus long tunnel autoroutier français, les collectivités

territoriales et les conseils généraux lancent des opérations de tunnels neufs pour améliorer leurs réseaux. Les domaines du ferroviaire et des TCSP ne sont pas inactifs puisque de nombreux projets sont en préparation en métropole ou sur l'île de La Réunion.

Les maîtres d'ouvrage, les concepteurs et les constructeurs auront dans un proche avenir à prendre en compte le "Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works" établi par l'International Association of Engineering Insurance et l'International Tunnelling Insurance Group. Il y a tout lieu de penser que leurs responsabilités seront beaucoup plus engagées. Il appartiendra alors aux maîtres d'ou-

vrage de s'entourer de partenaires très compétents et expérimentés, pour faire face à la complexité de plus en plus grande des projets, aux dérives financières malheureusement de plus en plus fréquentes et importantes, ainsi que pour optimiser les projets et maîtriser les coûts malgré les exigences de plus en plus élevées.

Pour les tunnels, comme en très haute montagne, il n'y a place ni pour l'amateurisme, ni pour l'improvisation récurrente.



■ **BERNARD FALCONNAT**

**Scetauroute**

**Directeur des Tunnels et Travaux souterrains**

# Tunnel de base du Lötschberg : pour le lot de Mitholz

Le 28 avril 2005, après plus de sept ans de travaux, le tunnel de base du Lötschberg (lot de Mitholz) a été percé. Ainsi s'achevait la première phase d'un projet de grande envergure : la première liaison ferroviaire sous les Alpes Suisses. Aujourd'hui, l'heure est à la réception des travaux et à la débauche du personnel. L'occasion pour Travaux de revenir sur ce chantier d'exception.



Figure 1  
Vue en 3D du projet du Lötschberg  
3D view of the Lötschberg Project

Figure 2  
Localisation des lots  
Location of work sections



## ■ MITHOLZ : LE LOT LE PLUS LONG ET LE PLUS DÉLICAT

Pièce maîtresse du tunnel de base du Lötschberg long de 34,6 km (figure 1), le lot de Mitholz (figure 2) comprend essentiellement la réalisation simultanée de trois tubes (65 à 77 m<sup>2</sup> de section) excavés à l'explosif : deux en direction du sud d'une longueur de 9,7 km chacun et un au nord d'une longueur de 8,6 km. Avec une longueur totale de 28 km, c'est le lot le plus long et le plus délicat du projet. C'est de lui que dépend la réalisation du tunnel de base dans les délais.

Bien que le projet du Lötschberg soit un système à deux tubes simple voie, un seul sera revêtu et exploité pour réduire l'investissement initial. L'autre tube, percé et recouvert de béton projeté, servira de galerie de secours et d'entretien. Puis quand il y aura saturation du trafic, de nouveaux travaux seront effectués pour sa mise en service. Il est relié au tunnel est par des rameaux de sécurité espacés de 333 m.

Au nord, seul un tube est percé mais deux échangeurs, situés aux extrémités, comportent des amorces de tube pour faciliter l'exécution des travaux dans le futur. La galerie de reconnaissance, parallèle à ce tube et reliée par des galeries transversales tous les 333 m, servira de galerie de secours.

Le lot inclut également :

- ◆ l'excavation et le revêtement de 56 galeries transversales (L = 30 m), de deux chambres de relais (L = 35 m ; l = 18 m ; H = 14 m), de deux centrales électriques, de deux centrales de ventilation, d'un puits de ventilation et d'une galerie d'essai ;
- ◆ des travaux complémentaires dans des zones déjà excavées (lot préparatoire), à savoir la galerie

### SATCO, UN CONSORTIUM EUROPÉEN

Le lot de Mitholz a été attribué en l'an 2000 au consortium SATCO (Schweizer AlpTransit Consortium), groupement d'entreprises comprenant Vinci Construction Grands Projets (France), Skanska (Suède), Strabag (Autriche), Walo-Bertschinger AG (Suisse) et Rothpletz-Lienhard (Suisse).

Le contrat a été signé le 17 février 2000 pour un montant de 350 millions d'euros et devrait s'élever en fin de chantier à 445 millions d'euros.

# 28 km d'excavation

**Pascal Richard**

DIRECTEUR DE SECTEUR  
Vinci Construction  
Grands Projets



**François Pogu**

DIRECTEUR ADJOINT  
ET RESPONSABLE BÉTON  
Vinci Construction  
Grands Projets



**Mathieu Augereau**

INGÉNIEUR TRAVAUX  
Vinci Construction  
Grands Projets

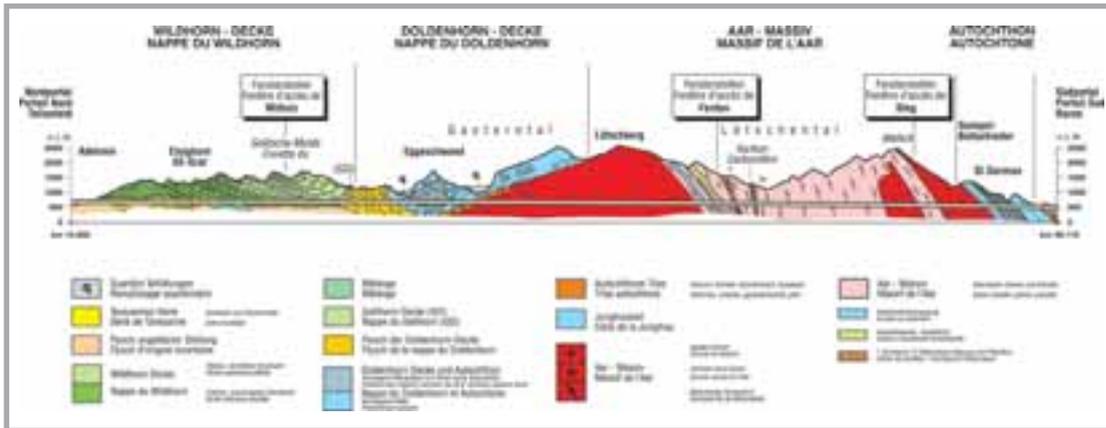


Figure 3  
Coupe géologique  
Geological  
cross section

de reconnaissance, la fenêtre d'accès d'une longueur de 1,5 km et de pente 12 % et la zone Fusspunkt (point de départ de l'excavation des trois tubes) comprenant des cavernes et des galeries dédiées aux installations puis à l'exploitation ultérieure de l'ouvrage.

Alors que la date contractuelle de fin de chantier est le 31 décembre 2006, les tubes nord-est et sud-est ont été livrés dès février 2006. Actuellement, les entreprises d'équipements ferroviaires posent les rails.

## ■ UNE GÉOLOGIE GLOBALEMENT CONFORME AUX PRÉVISIONS

Le tunnel du Lotscherberg traverse des formations géologiques très différentes qui ont fait opter pour la technique d'excavation à l'explosif. Elles vont de la roche sédimentaire de qualité variable au granit, présentant des résistances à la compression de 5 à 200 MPa, en passant par une zone autochtone associée à des arrivées d'eau à 50 l/s sous une pression de 35 bars. Globalement, peu d'arrivées de gaz ont été relevées.

La géologie rencontrée a été conforme aux prévisions (figure 3) hormis une zone de roches sédimentaires carbonifères rencontrée en bordure nord du bloc de granit du Gastern (voir plus loin).

## ■ UNE ORGANISATION DE CHANTIER TRÈS COMPLEXE

### Les dispositions pour minimiser l'impact environnemental

Pour minimiser les impacts environnementaux, l'atelier principal, deux centrales à béton d'une capa-



Photo 1  
Vue aérienne  
des installations  
en surface  
Aerial view  
of surface facilities

cité de 60 m<sup>3</sup>/h chacune, la majorité du parc matériel, les éléments du traitement du marin et le stockage des consommables ont été installés dans les différentes cavernes se trouvant au Fusspunkt. En surface se trouvaient une centrale à béton de réserve, un atelier secondaire, les bureaux, une cantine et un cantonnement pouvant accueillir jusqu'à 450 ouvriers (photo 1).

Par ailleurs, une usine de traitement des eaux a permis, via des bassins de décantation, de filtres et de correction du pH par ajout d'acide carbonique, de retraiter les rejets en eau générés par les travaux.

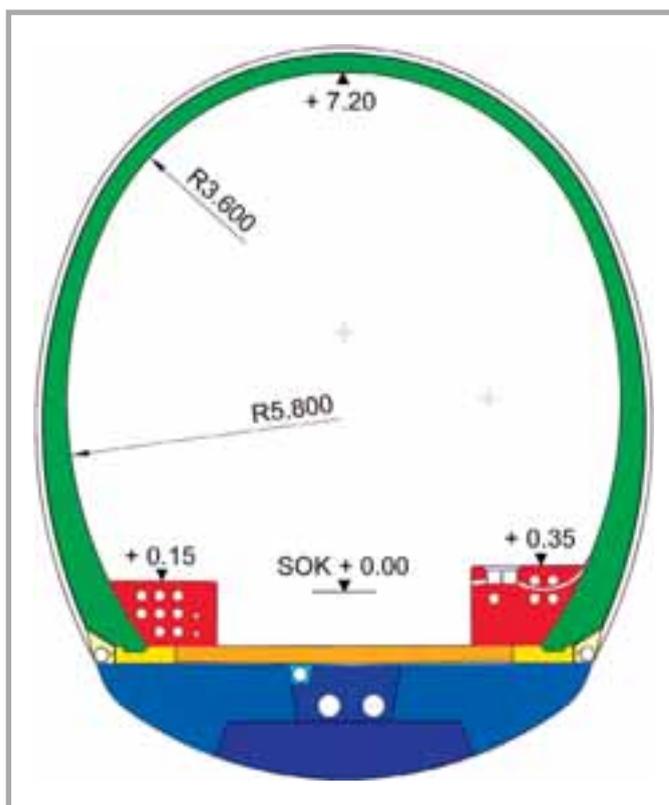
### Les solutions techniques pour la ventilation

Les galeries du tunnel ont été utilisées comme gaines naturelles de ventilation, notamment pour

**Photo 2**  
Les bandes  
transporteuses  
Conveyor belts



**Figure 4**  
Coupe type  
du tunnel  
Typical cross section  
of the tunnel



## LES TRAVERSÉES SOUTERRAINES DES ALPES SUISSES

Le tunnel ferroviaire du Lötschberg (voir *Travaux* n° 805) s'inscrit dans le cadre du projet AlpTransit dont l'objectif est de permettre la circulation des trains à grand gabarit et à grande vitesse entre l'Europe du Nord et l'Italie. D'une longueur de 34,6 km, le tunnel de base du Lötschberg traverse les Alpes Suisses de Frutigen dans le Kandertal (Canton de Berne) à Rarogne dans la vallée du Rhône (Canton du Valais). Le client BLS Alptransit prévoit sa mise en service au deuxième semestre 2007. Le budget prévisionnel réactualisé s'élève à 2,75 milliards d'euros. En attendant le percement du tunnel du Gothard (57 km), le Lötschberg devient le plus long tunnel ferroviaire de Suisse et le troisième au monde.



l'arrivée de l'air frais. Au nord, l'air frais était pris dans la galerie de reconnaissance. Au sud, le cheminement de l'air frais provenait du tube ouest et passait dans le tube Est au niveau d'une galerie transversale située à moins de 300 m du front. Des cloisons étanches installées dans chaque galerie transversale précédente et un sas dans le tunnel sud-ouest permettaient de mettre ce dernier en surpression.

Au nord comme au sud, l'air vicié empruntait la fenêtre d'accès et était rejeté au portail de Mitholz. Conformément à la législation, des groupes de climatisation Matrans et Herco permettaient de maintenir une température dans le tunnel inférieure à 28 °C.

Après un tir à l'explosif, l'air frais était amené au front tandis que l'air vicié était extraité du front de tir puis transporté au moyen de gaines de ventilation jusqu'au portail de Mitholz.

L'association de dépoussiéreurs (situés au-dessus des concasseurs) à un système d'arrosage en continu limitait l'émission de poussières.

## ■ LE DÉTAIL DES TRAVAUX

Au plus fort de l'activité du chantier, 450 ouvriers et 30 cadres de plus de dix nationalités ont travaillé pour réaliser ce projet exceptionnel.

### Une excavation à l'explosif

L'excavation a été réalisée en s'appuyant sur la nouvelle méthode autrichienne. L'explosif utilisé était de l'émulsion transportée puis injectée par camion Dyno avec une consommation finale voisine de 2,4 kg/m<sup>3</sup> excavé. Les détonateurs étaient de type non électriques avec des retards en milli ou en secondes. La plus grande longueur de foration a été de 4,5 m pour un résultat moyen de 4,1 m.

En raison de délais tendus, les trois tubes ont été excavés simultanément à l'explosif selon une méthode privilégiant l'autonomie et la flexibilité de chaque front (photo 2). Au sud, l'avancement a été fait en parallèle. Il n'y avait pas de pianotage entre les deux tubes (voir encadré "Le matériel d'excavation utilisé").

Les rendements moyens obtenus étaient de l'ordre de 250 m/face/mois avec trois volées effectuées par jour et par front.

Quand cela s'avérait nécessaire, le présoutènement du front de taille était réalisé à l'aide de boulons de grande longueur en fibres de verre de type GFK.

Le soutènement de la section courante était assuré par des ancrages adaptés au terrain : Swellex, SN, IBO ou Gewi, associés à un treillis soudé et à une ou deux couches de béton projeté de 3 à 8 cm d'épaisseur.

## Un revêtement intérieur totalement bétonné

Le tube Est sera le seul exploité dans un premier temps. Il est entièrement bétonné. Son profil type (figure 4), en forme de fer à cheval, se compose de trois parties principales : le radier, la voûte et les banquettes.

◆ Le radier, ou la contre-voûte quand les contraintes géologiques l'exigent, comprend les conduites et les regards pour la collecte des eaux. Un drainage vertical permet le captage des eaux du sol et leur évacuation par l'intermédiaire d'un drain central relié à des regards principaux tous les 80 m.

Sur le chantier de Mitholz, un complexe d'étanchéité (photo 3) a été systématiquement mis en place sur une fine couche de béton projeté. Ce complexe est composé d'un matériau drainant (Enkadrain), d'un géotextile de 500 g/m<sup>2</sup> et d'une membrane PVC de 2 mm d'épaisseur. Cette composition varie selon l'hydrologie rencontrée. L'eau est évacuée par des drains placés au pied de la voûte et connectés à des regards secondaires espacés de 80 m.

◆ La voûte, en béton non armé en section courante, présente une épaisseur théorique de 25 cm. Elle a été bétonnée en place à l'aide de coffrages glissants de marque Novaform et Moser. D'une longueur de 12,5 m et pesant environ 120 t, ils étaient montés sur des rails et ancrés dans le radier à chaque bétonnage pour éviter son soulèvement. Le béton était fabriqué dans les centrales situées dans la caverne du Fusspunkt, transporté par camion puis pompé au moyen d'une Schwing BP 2000. La cadence de bétonnage était d'un bloc par jour et par coffrage, soit 250 m<sup>3</sup> en moyenne. En raison d'une température élevée dans le tunnel, il était nécessaire d'effectuer un traitement thermique du béton. C'est pourquoi un portique de 25 m suivait le coffrage et permettait un séchage approprié, grâce à la circulation d'eau sur une bache en contact avec le béton. Dans certains cas, un produit de cure était pulvérisé sur la surface du béton. L'injection de clavage de la voûte était réalisée sur un autre portique équipé du matériel (malaxeur, pompe) nécessaire à la fabrication du coulis d'injection.

◆ Des coffrages métalliques de marque Poser pesant 30 t et mesurant 12,5 m de long ont permis le bétonnage des deux banquettes latérales, tout en laissant libre le passage des véhicules. Des fourreaux électriques en attente noyés dans les banquettes étaient maintenus grâce à des chablon en polyester.

## Du matériel et des techniques spécifiques

Sur le lot de Mitholz il y avait notamment deux échangeurs et quatre cavernes techniques. Ces zones non habituelles ont nécessité du matériel et des techniques spécifiques.



Photo 3  
Complexe  
d'étanchéité  
*Damp-proof  
course*



Photo 4  
Coffrage Doka  
*Doka formwork*

## La zone d'élargissement des deux échangeurs

Dans la phase d'exploitation, les trains passeront d'un tube du tunnel à l'autre par un système d'aiguillage. Cette zone est caractérisée par un profil s'élargissant selon un cône. Le parement (partie basse de la voûte) est réalisé avec un coffrage métallique de marque Poser de 12,5 m et de 5 m de haut.

Le coffrage de la voûte supérieure, de marque Doka (photo 4), s'adapte facilement aux variations géométriques du profil tout en permettant le passage des véhicules.

Quand les dimensions ne permettent plus l'utilisation d'un coffrage, le système breveté Valplast a été mis en œuvre. Il se compose :

◆ d'une étanchéité classique associée à une épais-

**Photo 5**  
**Coffrage Péri**  
*Peri formwork*



se couche de matériaux drainants injectés entre le terrain et la membrane d'étanchéité ;

- ◆ de cintres de ferrailage fixés à la voûte par des ancrages ;

- ◆ des treillis soudés classiques.

2500 m<sup>3</sup> de béton projeté et 13800 m<sup>3</sup> de béton coulé en place ont été utilisés pour réaliser les deux échangeurs du lot de Mitholz.

### **Les quatre cavernes techniques**

Elles ont des dimensions importantes : 35 m de long, 18 m de large et 14 m de haut. Les difficultés majeures rencontrées sont le ferrailage et le coffrage.

Les cintres composés de quatre armatures ont été préfabriqués en usine, amenés en pièces détachées, montés, soudés et fixés dans la voûte avec des ancrages.

Le coffrage, de marque Péri (photo 5), a permis dans un premier temps de réaliser les parements. La structure métallique, occupant toute la largeur de l'ouvrage, reprenait la poussée du béton et permettait le bétonnage simultané des deux côtés. La modification du coffrage a permis par la suite de réaliser la voûte.

### **Une zone géologique imprévue et contraignante**

Au sud, une zone de roches sédimentaires carbonifères, imprévue, a été particulièrement difficile à franchir (photo 6) : depuis le creusement en avril 2004 jusqu'au bétonnage en septembre 2005, le terrain a convergé jusqu'à 80 cm. La date de mise en service aurait pu être compromise avec un avancement considérablement ralenti et des arrêts complets pendant plusieurs jours. Des moyens importants ont dû être mis en place pour laisser le terrain converger tout en assurant une sécurité

pour les travaux ultérieurs. Parmi ces moyens :

- ◆ des forages de grande longueur ;

- ◆ une mise en place de cintres TH 29 (qui n'ont pas résisté aux premières convergences trop importantes) ;

- ◆ un reprofilage après les convergences principales ;
- ◆ la mise en place d'un grand nombre d'ancrages et d'armatures pour amortir les mouvements résiduels ;

- ◆ une mise en place de cintres de type Kowari composés de plusieurs parties coulissantes ;

- ◆ la réalisation de quatre à six saignées longitudinales d'une hauteur de 50 cm. Ces saignées effectuées dans la roche se situent à la liaison des cintres et constituent ainsi un espace libre pour les convergences à venir.

Cette zone très difficile a été momentanément abandonnée pour laisser au terrain le temps de converger au maximum. Le coffrage de la voûte a donc été poursuivi jusqu'à la fin du lot puis il a fallu revenir à cette zone quatre mois plus tard. Auparavant, des cintres préfabriqués, composés de 4 HA16 espacés de 20 cm, ont été montés. Deux nappes d'armatures HA18 espacées de 20 cm ont renforcé ce premier dispositif. Le revêtement intérieur a été réalisé avec un béton spécial à haute résistance B50 d'une épaisseur maximale de 1,50 m. Sa formulation contient notamment des fibres métalliques et un dosage en ciment CEMII A - L32,5R de 400 kg/m<sup>3</sup>.

Le bétonnage spécial a été effectué à raison d'un bloc tous les deux jours.

La surveillance des convergences a été assurée par une instrumentation électronique placée dans le béton de voûte.

Ainsi, malgré d'importantes contraintes géologiques, environnementales, qualitatives et de planning, ce projet européen hors du commun est sur le point

## **LES PRINCIPAUX INTERVENANTS**

### **Maitre d'ouvrage**

Confédération Helvétique

### **Maitre d'ouvrage délégué**

B.L.S. AlpTransit SA

### **Direction générale des travaux**

Groupement Emch+Berger & UIB AG

### **Direction locale des travaux**

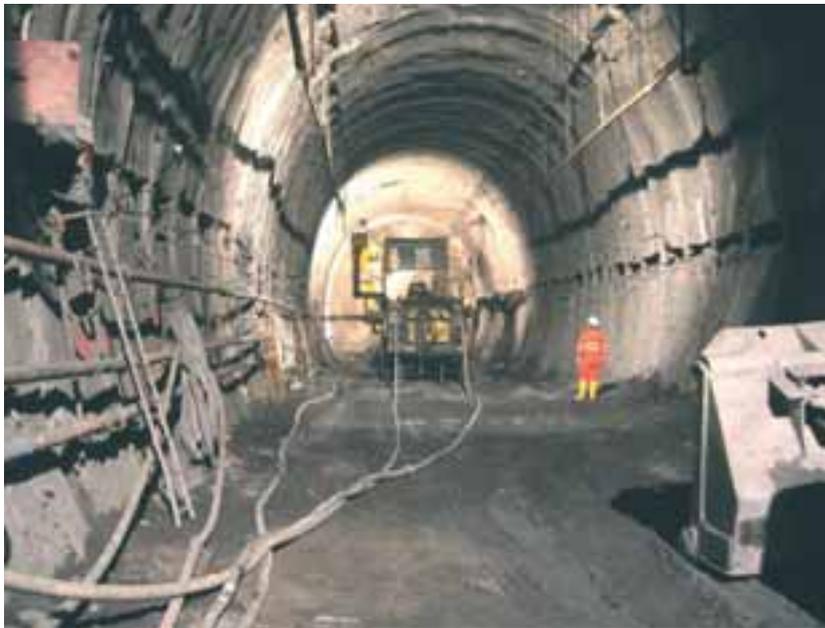
Groupement BBA & B+S Ingenieur AG

### **Mandataire**

SATCO

### **Sous-traitants**

- Etanchéité : groupement Bauveg-Strabag-Gunimperm
- Forages grande longueur : Morisette
- Injections : groupement Insond-Strabag-Injektosond



**Photo 6**  
**Zone cintrée**  
**Arched zone**

d'être livré avec trois mois d'avance. Le savoir-faire et la rigueur de tous les intervenants ont contribué à cette réussite. Rendez-vous au second trimestre 2007 lors de la mise en circulation du premier train commercial...

### LE MATÉRIEL UTILISÉ

Chacun des trois fronts était équipé du matériel suivant :

- un jumbo semi-automatique à trois bras : Atlas Copco XL3 C ;
- un jumbo Atlas Copco L2C ;
- un charge et roule GHH LF muni d'un godet de déversement latéral ;
- une chargeuse CAT 966G munie d'un godet de déversement latéral ;
- une nacelle élévatrice Normet deux bras ;
- un camion de chargement d'émulsion Dyno Nobel ;
- une pelle Liebherr R932T, équipée en godet, fraise et BRH pour les purges ;
- un robot de projection MBT Meyco O41 EH ;
- un érecteur de cintres ;
- un concasseur mobile DBT SB 1315R de capacité 1.200 t/h ; granulométrie maximale : 180 mm ;
- un convoyeur primaire qui transportait les matériaux jusqu'au convoyeur principal ;
- une plate-forme mobile Rowa, suspendue à la voûte du tunnel, qui permettait de déplacer un ensemble logistique de soutien à l'avancement (transformateurs, compresseurs, dépoussiéreurs, ventilation et bureaux).

### ABSTRACT

**Lötschberg tunnel - Mitholz work section. A European rail link through the Swiss Alps**

*P. Richard, Fr. Pogu, M. Augereau*

**A few months away from acceptance inspection, after more than seven years' work, the Lötschberg base tunnel (Mitholz work section) is nearing completion, with commissioning scheduled for the second half of 2007.**

**This project, worth 445 million euros, has been carried out in 84 months, and includes the explosive excavation and concreting of 28 km of galleries of cross section 62 to 77 sq. m.**

**The geological formations encountered are very different and in line with the forecasts apart from an unexpected carboniferous area having convergences of more than 80 cm which caused numerous complications.**

**Another feature of this project is the construction of several structures of large dimensions (caverns and widening areas) which required the use of special formwork.**

### RESUMEN ESPAÑOL

**Túnel del Lötschberg - Lote de Mitholz. Enlace ferroviario europeo a través de los Alpes Suizos**

*P. Richard, Fr. Pogu y M. Augereau*

**Con tan solo algunos meses de la recepción y tras más de 7 años de trabajos, el túnel de base del Lötschberg (Lote de Mitholz) se encuentra en vía de finalización para una entrada en servicio prevista durante el segundo semestre de 2007.**

**Este proyecto, de un importe de 445 millones de euros, ejecutado en 84 meses, incluye la excavación mediante explosivo y el hormigonado de los 28 kilómetros de galerías de 62 a 77 m<sup>2</sup> de sección.**

**Las formaciones geológicas presentes son sumamente distintas y guardan conformidad con las previsiones, excepto una zona carbonífera no registrada que presenta diversas convergencias de más de 80 cm que han dado lugar a numerosas complicaciones.**

**Este proyecto se caracteriza también por la ejecución de varias obras que**

presentan importantes dimensiones (cuevas y zonas de amplificación) que precisaron el empleo de encofrados especiales.

# Le tunnel de Ferden

## Ventilation et refroidissement

Cet article décrit les installations de ventilation et de climatisation, ayant permis le maintien de conditions climatiques acceptables, lors du creusement du tunnel de Ferden en Suisse.

Les températures des terrains rencontrés, supérieures à 45 °C, ont nécessité la mise en œuvre de systèmes aérauliques, hydrauliques et climatiques complexes.

Cet article décrit donc les installations suivantes :

- ventilation : systèmes primaires et secondaires;
- climatisation : production et distribution de froid;
- chauffage.

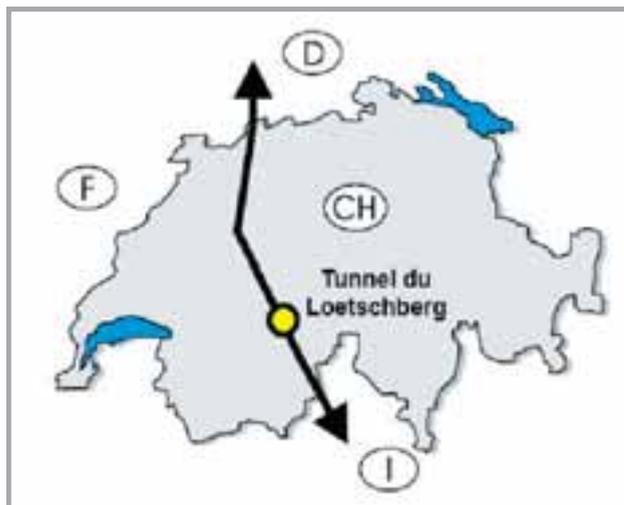
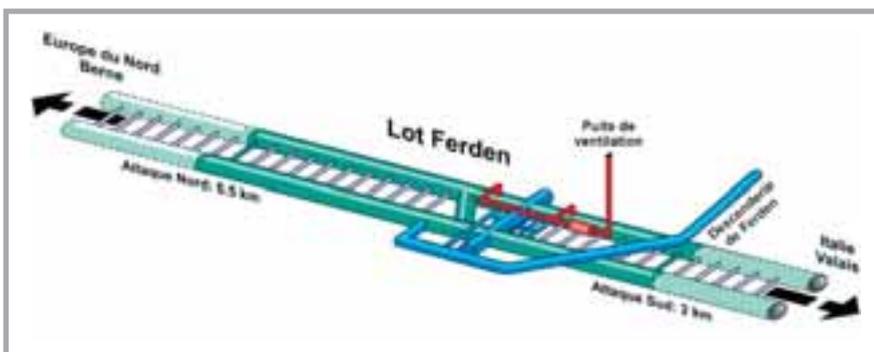
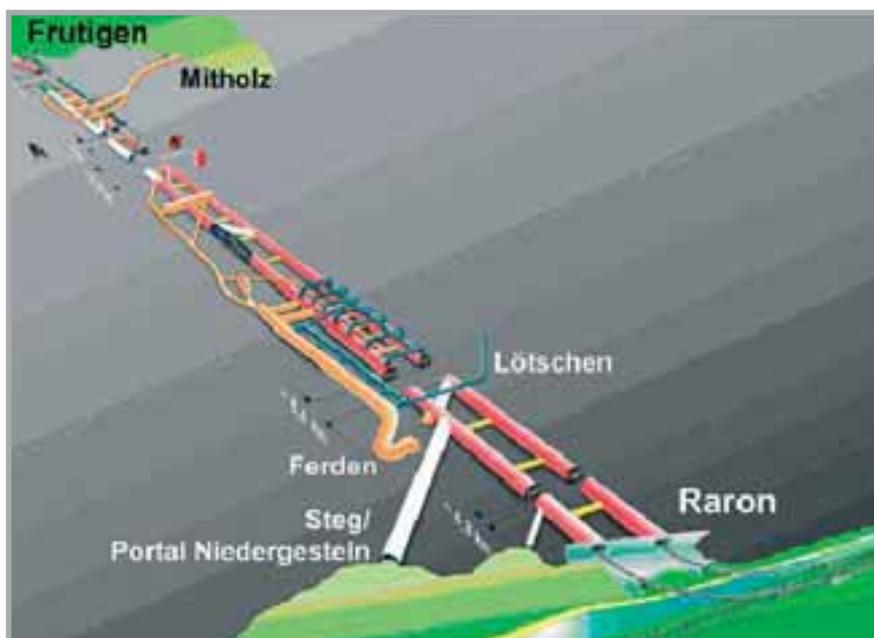


Figure 1  
Situation géographique  
Geographic location

Figure 2  
Tunnel du Lötschberg  
Lötschberg tunnel



### ■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le tunnel du Lötschberg est un tunnel ferroviaire bi-tube, de 35 km de long entre Frutigen dans le Kandertal (Oberland bernois) et Rarogne en Valais. Il doit permettre à terme, de transférer le trafic de transit des marchandises à travers les Alpes de la route au rail (figures 1 et 2).

Le tunnel de Ferden (figure 3), long de 8,5 km, est un des principaux tronçons du tunnel du Lötschberg. Sa construction a été confiée au groupement d'entreprises Bouygues TP, Losinger, Prader AG, Evéquo, Dénériaz, U.Imboden, Visp, Theler et Raron. Les travaux ont démarré en 2001 et se sont achevés en 2006.

L'ouvrage est composé des éléments suivants :

- ◆ une descendrière de 5 km de long à 12 % de pente;
- ◆ deux tubes sud d'environ 2 km;
- ◆ deux tubes nord d'environ 6,5 km;
- ◆ une station centrale et ses ouvrages annexes (figure 3).

### ■ CONTRAINTES CLIMATIQUES

La couverture maximale du tunnel est de 2100 m. Elle est à l'origine de températures élevées de la roche, dépassant 45 °C sur certains tronçons (figure 4).

Le massif rocheux traversé génère donc un dégagement de chaleur important auquel il faut ajouter les apports de chaleur des machines de chantier. Le climat régnant en galerie est donc naturellement extrêmement chaud et humide avec des risques pour la santé médicalement identifiés.

La SUVA (organisme suisse de contrôle de l'hygiène du travail) réglemente les travaux physiquement éprouvants dans ces conditions en imposant le respect de valeurs maximum pour la température et l'humidité relative de l'air (figure 5).

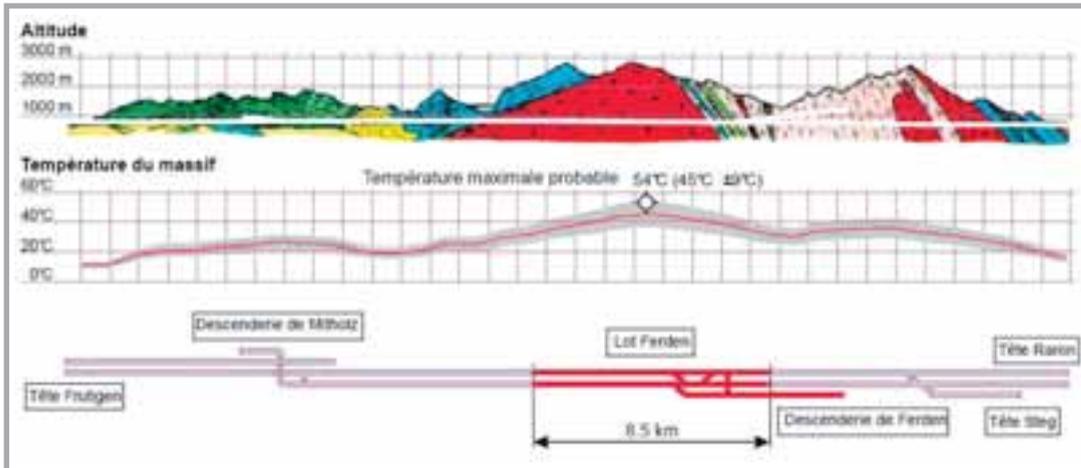
Contractuellement cette double contrainte – température/humidité – a été simplifiée, en imposant au groupement constructeur de maintenir une température sèche inférieure ou égale à 28 °C dans l'ensemble du tunnel.

C'est pour répondre à ces contraintes que les systèmes de ventilation et de climatisation du chantier ont été conçus et mis en œuvre.

Figure 3  
Lot Ferden  
Ferden work section



# du chantier



**Figure 4**  
 Température  
 du massif  
 Temperature  
 of the rock mass

## LA VENTILATION

### Architecture

La ventilation du chantier a été conçue pour permettre la dilution des polluants (fumées de tir, pollution des véhicules et engins thermiques...) émis par les activités du chantier en dessous des valeurs limites définies réglementairement.

Dans le cadre du tunnel de Ferden, les textes applicables sont la SIA 196 "Ventilation de chantiers souterrains" et les instructions de la SUVA.

Le concept de ventilation a été défini en intégrant la configuration particulière du chantier dont les quatre fronts (deux tunnels nord et deux tunnels sud) ne sont accessibles qu'au travers d'une descenderie de 5 km de long.

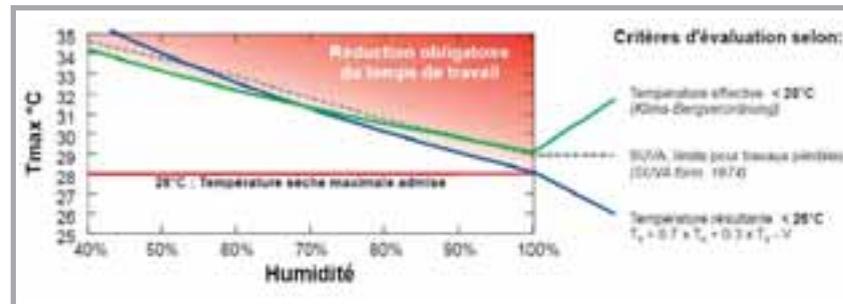
L'air frais est ainsi transporté par cette descenderie, avant d'être réparti jusqu'aux quatre fronts principaux. Plusieurs fronts secondaires, ainsi qu'une zone de bureaux et une zone de maintenance sont également alimentés.

L'air vicié est repris au niveau des fronts avant d'être transporté dans des ventubes souples vers un réseau de galeries raccordées à la station de ventilation principale, avant d'être rejeté dans l'atmosphère par un puits de 400 m de profondeur. Au niveau de chaque front, une ligne de ventilation soufflante assure l'amenée d'air frais au plus près des travailleurs, et permet de rabattre les fumées après chaque tir (figure 6).

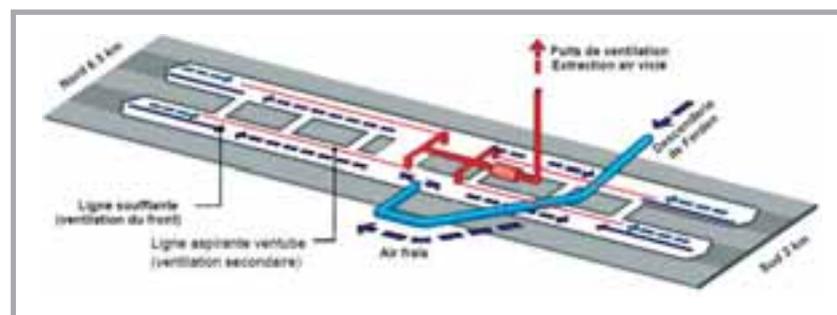
La mise en œuvre de ce système de ventilation a nécessité l'installation de quarante ventilateurs en période de pointe, pour une puissance installée d'environ 2 MW (figure 7, page suivante).

### Besoins en air frais

Les besoins de renouvellements en air frais ont été définis pour assurer la dilution des poussières et



**Figure 5**  
 Conditions  
 climatiques  
 réglementaires  
 Regulatory  
 climatic conditions



**Figure 6**  
 Réseau  
 de ventilation  
 Ventilation  
 network

fumées de tir, et des polluants émis par les engins thermiques, sur la base des prescriptions de la SIA 196 :

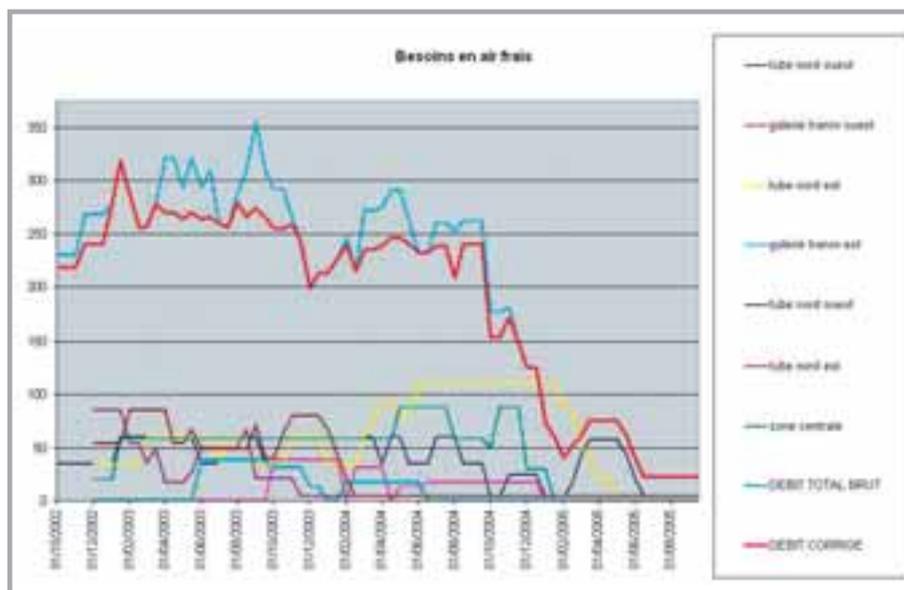
- ◆ débit unitaire pour les personnes : 25 l/s/personne ;
  - ◆ débit unitaire pour la dilution des polluants diesels :
    - 4 m<sup>3</sup>/min/kW pour les chargeuses et les pelles,
    - 2 m<sup>3</sup>/min/kW pour les dumpers, toupies ;
  - ◆ débit unitaire pour la dilution des poussières et fumées de tir : 300 l/s/m<sup>2</sup> de section excavée.
- Pour tenir compte de la multiplicité des ateliers et du cumul des besoins des différents fronts, les besoins en air frais ont été estimés mois par mois. Ils ont ensuite été écartés en fonction du nombre maximum d'engins polluants, réellement disponibles sur le chantier.

Au global, un besoin maximum de 300 m<sup>3</sup>/s a été

Figure 7  
Liste  
des ventilateurs  
List of fans

N°	Codification			Libellé
	Groupe	Sous Gr.	Code	
1	100	001	100001	Ventilateur ASS1 630kW
2	100	002	100002	Ventilateur ASS2 630kW
3	100	003	100003	Ventilateur BWN A-1
4	100	004	100004	Ventilateur BWN A-3
5	100	005	100005	Ventilateur BWN A-4
6	100	006	100006	Ventilateur BON A-1
7	100	007	100007	Ventilateur BON A-3
8	100	008	100008	Ventilateur BON A-4 1
9	100	009	100009	Ventilateur BON A-4 2
10	100	010	100010	Ventilateur ZLS 1
11	100	011	100011	Ventilateur ZLS 2
12	100	012	100012	Ventilateur SPW
13	100	013	100013	Ventilateur ex SPW 160
14	100	014	100014	Ventilateur BOS QS74 Droite
15	100	015	100015	Ventilateur BOS QS74 Gauche
16	100	016	100016	Ventilateur BWS
17	100	017	100017	Ventilateur ex BON QS66 BON A-4
18	100	018	100018	Ventilateur BWN 1
19	100	019	100019	Ventilateur BWN 2
20	100	020	100020	Ventilateur BON 1
21	100	021	100021	Ventilateur BON 2
22	100	022	100022	Ventilateur ZLS
23	100	023	100023	Ventilateur SPW
24	100	024	100024	Ventilateur ZZP
25	100	025	100025	Ventilateur Clim BWN QS84 Haut
26	100	026	100026	Ventilateur Clim BWN QS84 Bas
27	100	027	100027	Ventilateur Clim BON QS62 Bas
28	100	028	100028	Ventilateur Clim BON QS62 Haut
29	100	029	100029	Ventilateur Clim Frigo 1 G1 SPW
30	100	030	100030	Ventilateur Clim Frigo 2 G1
31	100	031	100031	Ventilateur Clim Frigo 1 G2
32	100	032	100032	Ventilateur Clim Frigo 2 G2
33	100	033	100033	Ventilateur Clim Frigo 3 G2
34	100	034	100034	Ventilateur Clim Frigo 4 G2
35	100	035	100035	Ventilateur Clim Bureau
36	100	036	100036	Ventilateur Clim 250 kW BON QS60
37	100	037	100037	Ventilateur Clim 250 kW BWN QS58
38	100	038	100038	Ventilateur Refroid. 630kW 1
39	100	039	100039	Ventilateur Refroid. 630kW 2
40	100	040	100040	Ventilateur Refroid. 630kW 3

Figure 8  
Besoins en air frais  
Fresh air needs



retenu pour l'ensemble du chantier, chaque front ayant un besoin compris entre 50 et 100 m³/s (figure 8).

### La station de ventilation principale

La station de ventilation principale a pour fonction d'assurer la ventilation primaire du chantier, à savoir :

- ◆ l'amenée de 300 m³/s d'air frais de l'entrée au pied de la descendrière ;
- ◆ la reprise de 300 m³/s d'air vicié, depuis les galeries de reprises, jusqu'au puits de rejet.

Elle est composée de deux groupes moto-ventilateurs de 630 kW chacun, fonctionnant en parallèle. Cette disposition permet, en cas de panne d'une machine, de disposer d'un ventilateur de secours (photo 1).

### La ventilation secondaire des fronts

Les fronts sont ventilés traditionnellement avec une ventilation aspirante. Compte tenu des longueurs importantes des attaques (jusqu'à 6,5 km), cette disposition est préférable à une ventilation soufflante, en particulier en phase d'évacuation des fumées de tir, où elle évite de neutraliser les activités du tube concerné.

Afin de limiter la pression de refoulement du ventilateur aspirant, et donc la pression dans les ventubes, un ventilateur relais est installé tous les 2 km. Cette disposition accroît sensiblement le nombre de ventilateurs à installer, mais permet de limiter les risques de déchirure des ventubes, ainsi que les fuites d'air vicié du ventube vers le tunnel.

L'installation est complétée par une ligne soufflante à front, qui permet de rabattre les fumées de tir, et de maintenir une ventilation au plus près du front. Ces ventilateurs sont installés sur des plates-formes

### LE PROJET DU TUNNEL DE BASE DU LÖTSCHBERG (SUISSE)

- Constructeur : JV
- Montant du contrat (HT) : 461 M SFR (fixe : 376 M SFR + options : 85 M SFR)
- Délai : 54 mois

#### Les dates clés :

- 28 février 2001 : signature du contrat
- 1<sup>er</sup> mai 2001 : début des travaux
- 1<sup>er</sup> juillet 2005 : fin des travaux
- Mai 2007 : mise en service

mobiles situées à environ 150 m des fronts (photo 2).

### La mise au point

Les systèmes de ventilation décrits précédemment représentent une installation hors du commun sur un chantier de tunnel.

La mise en service de cet ensemble a demandé une longue mise au point, puis des évolutions régulières.

Le réseau primaire, véritable poumon du système a notamment fait l'objet d'optimisations aérodynamiques, afin de garantir le débit requis de 300 m<sup>3</sup>/s. Le réseau a été amélioré par la mise en œuvre d'aubages directeurs, au droit des singularités les plus significatives et les moto-ventilateurs eux-mêmes ont également été optimisés grâce à l'ajout de pavillons, de bulbes et de diffuseurs performants (figures 9 et 10).

Globalement, ces améliorations ont permis de réduire les pertes de charges de 4 000 à 3 000 Pa, et de réduire dans les mêmes proportions la consommation électrique nécessaire au fonctionnement du réseau primaire (figure 11, page suivante).

## LA CLIMATISATION

Les contraintes climatiques décrites précédemment ont nécessité l'installation d'un système de climatisation apte à refroidir le tunnel.

### Principe général

Le barrage de Ferden, situé à proximité du chantier constitue une réserve d'eau froide importante (1 million de mètres cubes), dont la température ne dépasse jamais + 5 °C. Une station de pompage installée au droit du barrage, permet donc le captage et le filtrage de cette eau qui alimente deux échangeurs à plaques de 2,5 MW chacun. Ces échangeurs permettent le refroidissement d'un



Photo 1  
Station de ventilation principale  
Main ventilation station



Photo 2  
Ventilateur aspirant sur plate-forme  
Exhaust fan on platform

Figure 9  
Optimisation du réseau  
Network optimisation

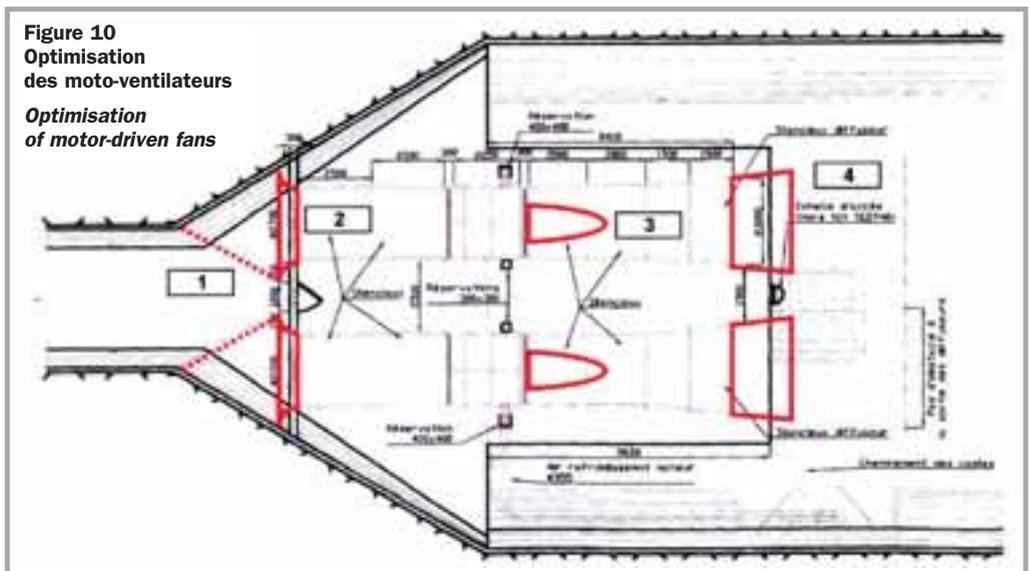
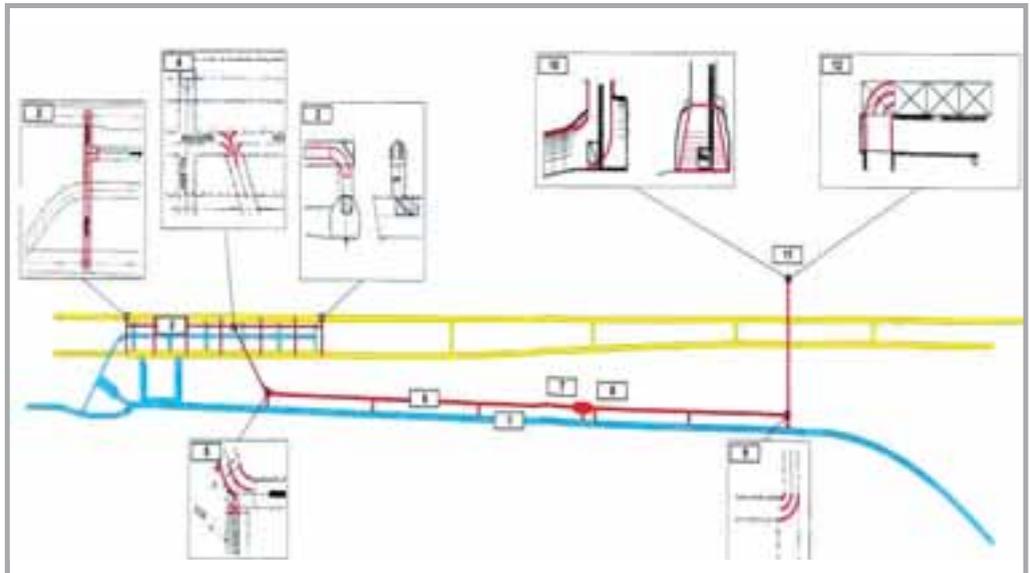


Figure 10  
Optimisation des moto-ventilateurs  
Optimisation of motor-driven fans

### DÉTAIL DU PROJET (LOT 46.23.01)

- Tunnel ferroviaire doubles tubes
- 1 galerie d'accès L = 4 km/i = 12 % descendante
- Tunnel sud : 2 tubes de 2 150 m (y compris 1 km option)
- Tunnel nord : 2 tubes de 7 550 m (y compris 2 km option)
- Station centrale + ouvrages annexes L = 450 m
- Profil type (excavation) : 63 - 78 m<sup>2</sup>

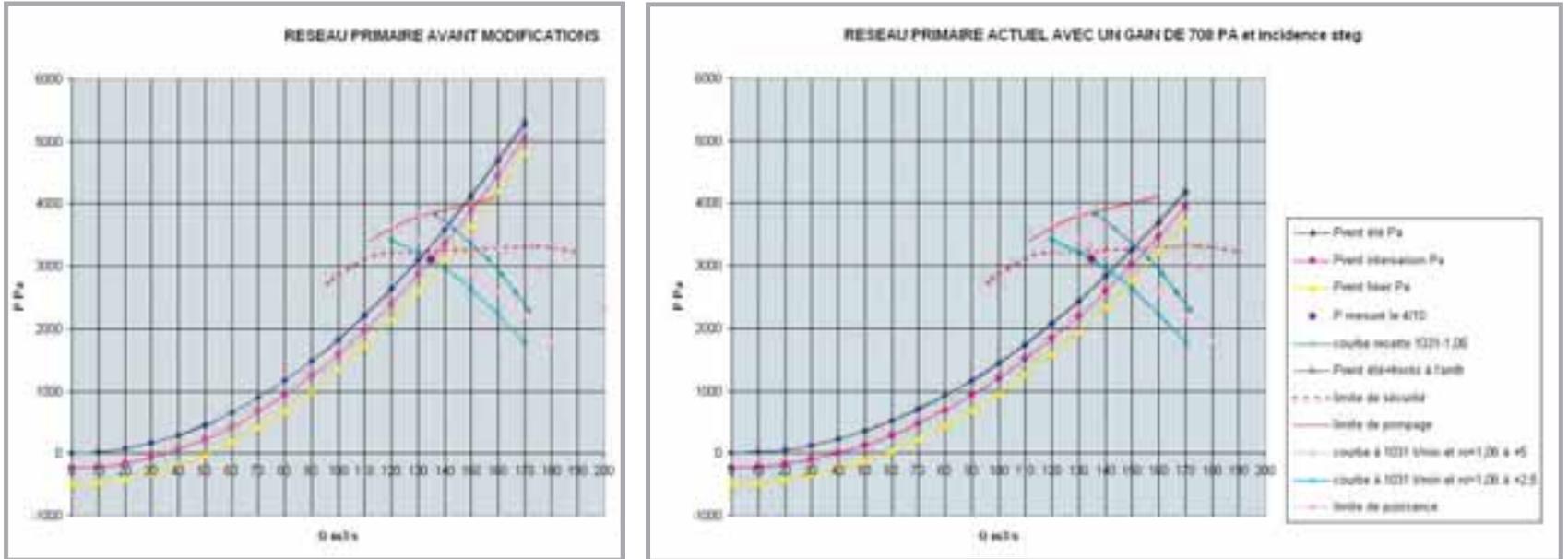


Figure 11  
Réduction des pertes de charges et optimisation du point de fonctionnement  
Reduction in pressure drops and optimisation of the operating point



réseau fermé, qui alimente à son tour plusieurs échangeurs ou machines frigorifiques disposés régulièrement dans le tunnel (figures 12 et 13).

**Le réducteur de pression à trois chambres**

Cet organe constitue une des particularités du réseau hydraulique. Le dénivelé entre les deux échangeurs situés au droit du barrage et les tunnels étant proche de 600 m, cet appareil permet d'une part de réduire la pression au pied de la colonne d'eau et donc de concevoir un circuit de distribution en tunnel basse pression.

D'autre part, il permet de "récupérer" la pression statique de la colonne d'eau (60 bars!) pour remonter l'eau "chaude" jusqu'aux échangeurs du barrage. Les pompes de circulation sont ainsi sim-

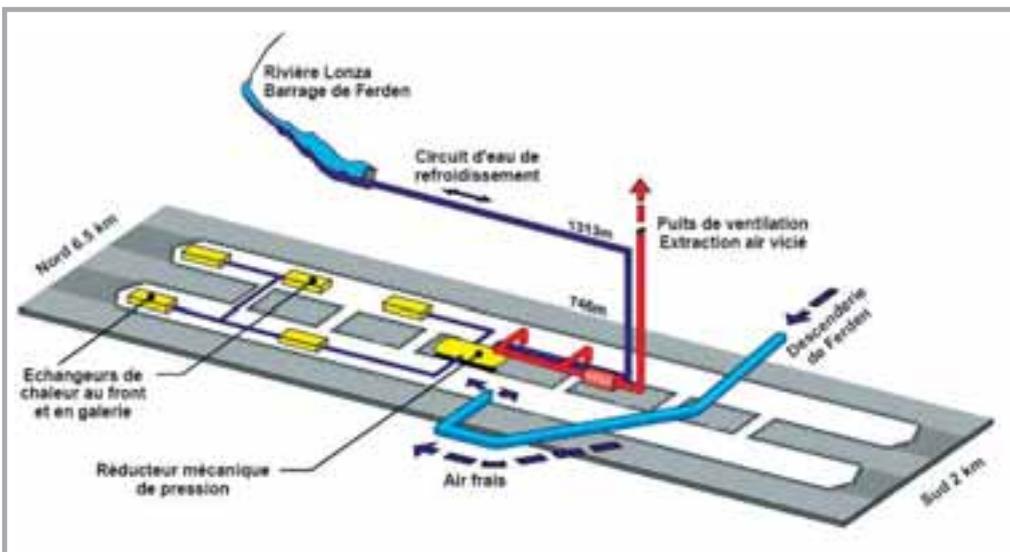
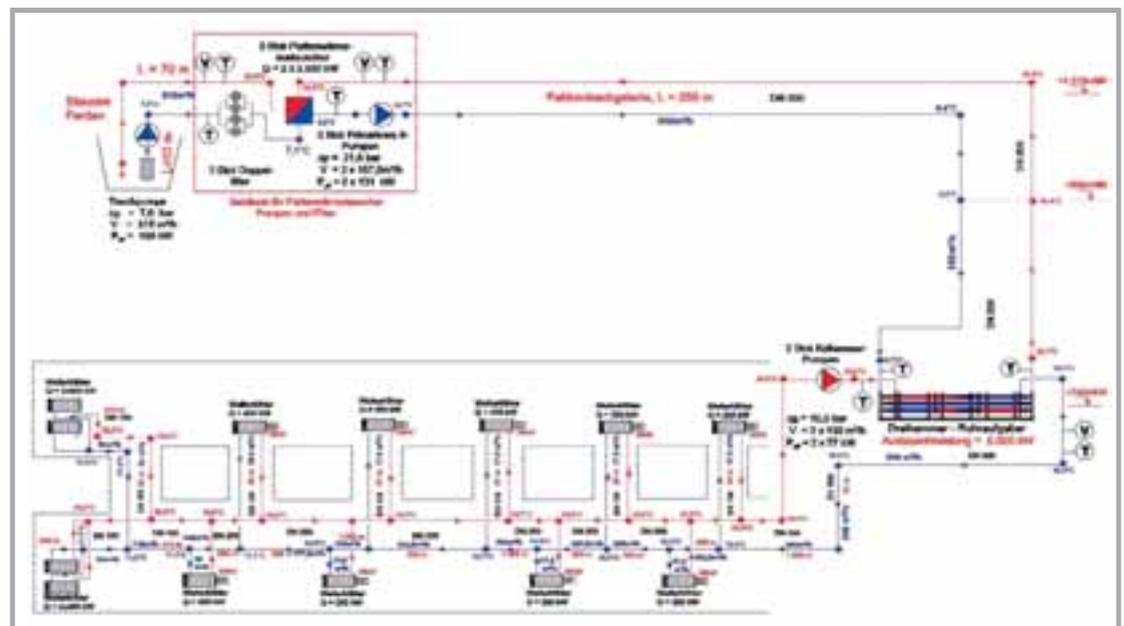


Figure 12  
Principe général de climatisation  
General principle of air conditioning

Figure 13  
Réseau hydraulique de climatisation  
Air conditioning hydraulic network



plement dimensionnées pour reprendre les pertes de charges linéaires du réseau (figure 14).

### Les échangeurs

Les échangeurs sont les premières machines à avoir été installées sur le réseau. Il s'agit d'échangeurs eau/air au travers desquels l'air est insufflé par un ventilateur axial (figure 15). Ces échangeurs équipent les lignes de ventilation soufflantes de chaque front.

### Les groupes frigorifiques

Au cours de l'avancement du chantier le réseau de climatisation a été renforcé en y greffant des groupes frigorifiques. Plus coûteuses et plus complexes que les échangeurs, ces machines pressentent cependant l'avantage d'être moins consommatrices d'eau "froide", et de délivrer une puissance frigorifique quasi constante, quelles que soient les conditions de température ambiante (figure 16).

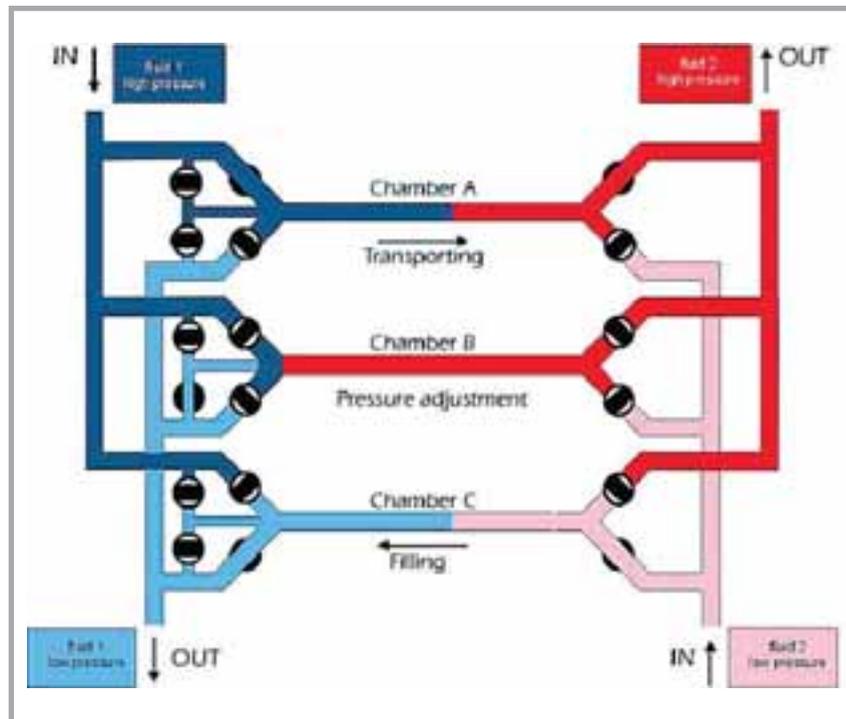


Figure 14  
Principe de fonctionnement du réducteur de pression  
Principle of operation of the pressure reducer

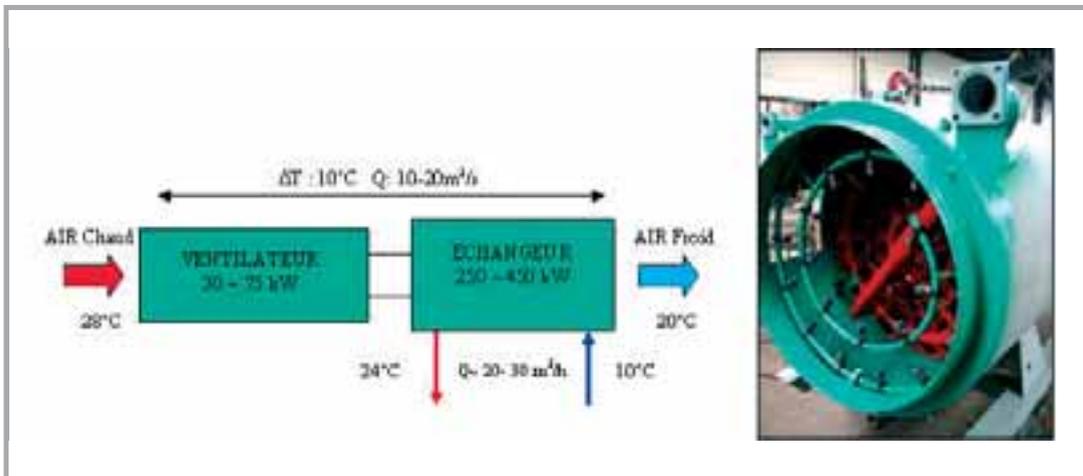


Figure 15  
Les échangeurs  
Heat exchangers

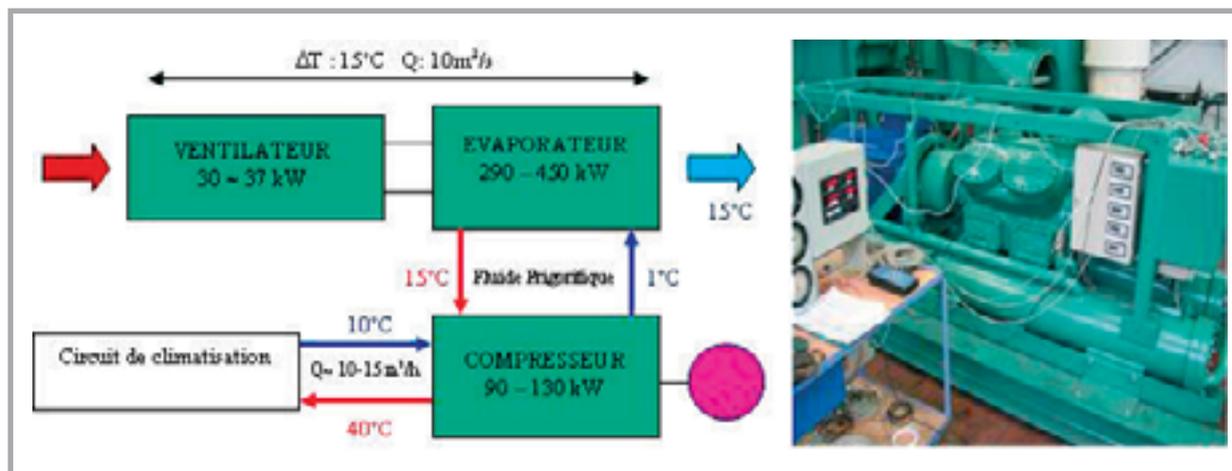
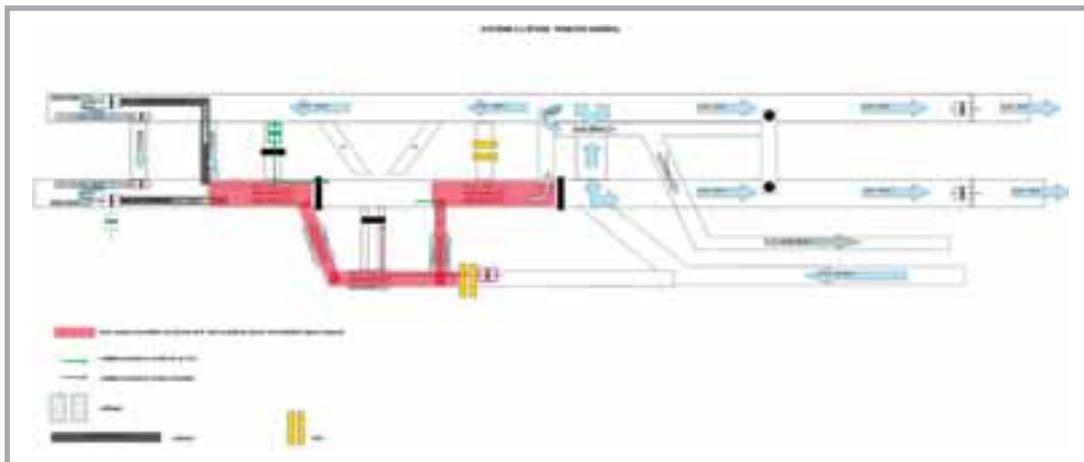


Figure 16  
Les groupes frigorifiques  
Refrigerating units



**Figure 17**  
Système de ventilation à recirculation  
*Recirculation ventilation system*



**Photo 3**  
Sas pour intertube  
*Air lock for intertube*

## La mise au point

De même que le circuit de ventilation, le réseau de climatisation et ses équipements ont fait l'objet d'une période de mise au point et d'apprentissage importante.

## Et le chauffage...

C'est le paradoxe de Ferden ! Les températures extérieures descendent jusqu'à - 15 °C l'hiver. Alors que dans les tunnels les installations de climatisation continuent à maintenir des températures acceptables, la descenderie d'accès doit être chauffée ! Elle permet en effet l'amenée de 300 m<sup>3</sup>/s d'air frais pour la ventilation. N'étant ni revêtue ni étanchéifiée sur son premier kilomètre, le risque de formation d'une calotte de glace empêchant tout accès au chantier et bloquant les convoyeurs est réel. Cinq chaudières à fuel de 1200 kW ont donc été installées pour éviter tout risque de gel l'hiver. En pointe, lorsque la température extérieure est de - 15 °C, la consommation de fuel est de 14000 l/jour.

## L'ÉVOLUTION DES SYSTÈMES

L'avancement des différents fronts et la mise en œuvre des ateliers de bétonnage de voûte ont conduit à faire évoluer le système de ventilation en cours de chantier.

## Phase 1

Le système de ventilation secondaire, reposant initialement sur le principe d'une ventilation aspirante par front, a été modifié en cours de chantier. Un système basé sur la recirculation de l'air du tube est vers le tube ouest (figure 17), a permis de supprimer le ventube circulant dans le tube est au travers des coffrages de voûte, simplifiant considérablement les opérations de déplacement du coffrage.

Cette modification a également permis de doubler les débits d'air transitant dans les tunnels nord, permettant un abaissement sensible d'environ 2 °C des températures dans le tunnel.

Il est important de noter que cette configuration a été rendue possible par la mise en œuvre d'un plan de circulation adapté et le remplacement des toupies par un train sur pneu. Les intertubes maintenus nécessaires pour assurer la circulation des engins ont également dû être équipés de sas automatisés (photo 3).

Le système de ventilation primaire est resté inchangé durant cette phase. De même, les ventilations aspirantes des fronts ont été maintenues afin de continuer à capter les fumées de tir, en assurant leur transport en ventube sur une distance maximale.

## Phase 2

Cette ultime phase a été mise en œuvre pour permettre le démontage des ventilateurs primaires de la station de ventilation principale, le but étant de réaliser les travaux de génie civil de cette future station de ventilation définitive.

Il s'agissait d'une étape majeure puisque le système primaire de ventilation, poumon de l'installation, était concerné.

Cette étape n'a eu lieu qu'à la fin des creusements, les besoins en air frais du chantier étant réduits de 300 à 200 m<sup>3</sup>/s.

Les ventilateurs primaires ont été remplacés par deux autres moto-ventilateurs, localisés dans l'intertube le plus proche des fronts nord, et assurant à la fois les fonctions de ventilation primaire et secondaire (photo 4).

## CONCLUSION

Les températures des terrains rencontrés lors des travaux du tunnel de Ferden, ont justifié la mise en œuvre de systèmes de ventilation et de refroidissement hors du commun :

- ◆ ventilation : 2 MW ;
- ◆ climatisation : 5 MW ;
- ◆ chauffage : 6 MW.

Si les puissances installées sont exceptionnelles, elles ne reflètent que partiellement la complexité

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS UTILISÉES (Y COMPRIS OPTIONS)

- Volume d'excavation : 1 680 000 m<sup>3</sup>
- Ancrages : 298 300 p.
- Béton projeté : 67 000 m<sup>3</sup>
- Béton coffré : 212 000 m<sup>3</sup>
- Etanchéités : 84 000 m<sup>3</sup>
- Canalisations : 75 000 ml



**Photo 4**  
**Ventilateurs principaux – Phase 2**  
**Main fans – Phase 2**

de ces ensembles. Des périodes de mise au point et d'apprentissage importantes ont été nécessaires pour en assurer le bon fonctionnement. Enfin, les synergies développées entre les équipes travaux, méthodes et matériel ont permis l'évolution et la progression de ces ensembles, pour répondre au mieux aux besoins et aux évolutions du chantier.

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS (JV)

### Entreprises

- Bouygues TP/France : 38 %
- Losinger Sion SA/Sion : 19 %
- Prader AG/Zürich : 19 %
- Evéquoz SA/Conthey; Dénériaz Sion SA/Sion; U.Imboden AG/Visp; Theler AG/Raron : 24 %
- Entreprise pilote : Losinger Sion SA
- Compta./Controlling : Prader AG
- Directeur du chantier : Philippe Dumont

### Commission technique

- Bouygues TP
- Losinger Sion SA
- Prader AG
- Dénériaz Sion SA

## ABSTRACT

### The Ferden tunnel : construction site ventilation and cooling

*M.-A. Douaud*

**This article describes ventilation and air conditioning systems used during Ferden tunnel excavation works, in order to maintain acceptable climatic conditions.**

**Ground temperatures that can be greater than 45 °C, have justified the installation of complex aeraulic, hydraulic and climatic systems.**

**This article describes the following systems :**

- **Ventilation : primary and secondary systems;**
- **Air conditioning : coolness production and distribution ;**
- **Heating.**

## RESUMEN ESPAÑOL

### Túnel de Ferden : ventilación y refrigeración de la obra

*M.-A. Douaud*

**En el presente artículo se describen las instalaciones de ventilación y de climatización, que permitieron el mantenimiento de condiciones climáticas aceptables, al proceder a la perforación del túnel de Ferden en Suiza.**

**Las temperaturas de los terrenos encontradas, superiores a los 45 °C, han precisado la implementación de sistemas aeráulicos, hidráulicos y climáticos complejos.**

**Por consiguiente, se describen en este artículo las instalaciones siguientes :**

- **ventilación : sistemas primarios y secundarios;**
- **climatización : producción y distribución de frío;**
- **calefacción.**

# Pour construire sur du solide de Médecine du Sport, le bâtiment fait alliance avec

La réalisation de l'Institut Monégasque de Médecine du Sport fait appel à différentes techniques rarement présentes dans une opération immobilière et encore plus rarement associées.

L'ouvrage comporte sept niveaux en superstructure et sept niveaux en infrastructure. Il est réalisé selon la méthode dite "top down".

La partie inférieure donne lieu à des travaux souterrains spectaculaires, complexes et innovants, mettant en œuvre du terrassement par sciage et à l'explosif, des micropieux, des injections, des soutènements, du génie civil et deux tunnels dont l'un est scié.

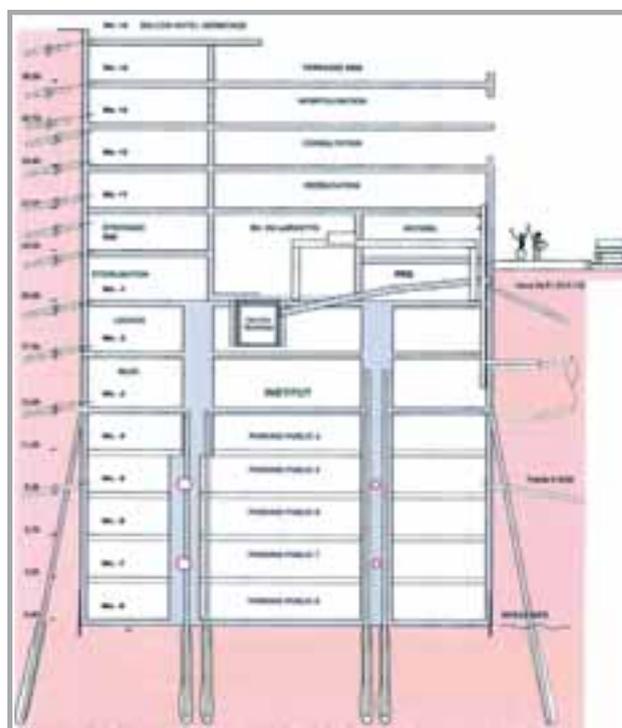
En raison de l'exigüité du chantier et de sa situation dans un environnement urbain très dense et sensible, de strictes précautions sont prises en vis-à-vis des nuisances et de la sécurité.



Photo 1  
Vue plongeante montrant l'environnement : Centre Cardio-Thoracique et boulevard d'Ostende (circuit de Formule 1)

Plunging view of the environment : Cardio-Thoracic Centre and Ostende boulevard (Formula 1 race track)

Figure 1  
Coupe de l'ouvrage  
Cross section of the structure



## ■ PRÉSENTATION DU PROJET

Tourné vers le rocher, dominant le port Hercule, dominé par l'hôtel Hermitage, l'Institut Monégasque de Médecine du Sport, encore appelé IM2S, semble s'être tout naturellement inscrit dans son environnement de prestige (photo 1).

Pourtant, il a fallu déjouer bien des difficultés pour implanter cet ouvrage de 14 niveaux dont 7 en infrastructure (figure 1) sur une parcelle calcaire de 1 400 m<sup>2</sup> qui comporte une falaise de 17 m, qui est traversée par une voie rapide et par de nombreux réseaux et dont le voisinage compte de luxueux hôtels, une clinique et le fameux circuit de Formule 1.

C'est à un groupement d'entreprises dirigé par Solétanche S.A.M., filiale monégasque de Solétanche Bachy, qu'ont été confiés les travaux de terrassement, les travaux spéciaux et les travaux d'infrastructure liés à la méthode "top down", constituant une difficulté majeure du projet.

Le chantier a commencé en 2003 pour une livraison début 2006. La méthode de construction "top down" s'imposait pour passer dans ce délai. Elle consiste à progresser simultanément vers le haut et vers le bas, pour gagner du temps, à partir d'une dalle de transfert.

Voici un résumé des différentes séquences de la construction :

- ◆ en premier on a découpé en blocs la falaise de 17 m de haut à partir d'une plate-forme de travail surplombant la voie rapide maintenue en circulation. La paroi rocheuse ainsi dégagée a été confortée par un clouage réalisé au fur et à mesure ;
- ◆ ensuite ont été réalisées la dalle de transfert, qui est l'ouvrage clé de la méthode "top down", et sa fondation sur micropieux :
  - 120 micropieux représentant 3 000 m de perforation ont été mis en œuvre pour reprendre les 35 000 t de la superstructure. Les vides karstiques rencontrés dans la zone de scellement des micropieux ont été préalablement traités par injection, nécessitant près de 700 m<sup>3</sup> de coulis et de mortier colloïdal,
  - la dalle de transfert a été alors réalisée, intégrant en surface la voie de circulation rapide et, en dessous, l'ensemble des réseaux situés dans l'emprise de chantier ;
  - ◆ une fois cette dalle de transfert construite, ont été développés simultanément les travaux de superstructure et d'infrastructure, de part et d'autre de la dalle de transfert ;
  - ◆ pour l'infrastructure, 30 000 m<sup>3</sup> de rocher cal-

# l'Institut Monégasque

## les travaux souterrains



**Photo 2**  
Confortement au pied de l'hôtel Hermitage et début du dressage de la falaise par sciage depuis un platelage à 17 m de haut

*Consolidation at the base of the Hermitage Hotel and start of cliff facing by sawing from decking 17 metres high*

caire ont été minés en taube dans l'encombrement des 120 micropieux supportant la dalle de transfert et la superstructure ;

◆ les vibrations engendrées par ces travaux et notamment par l'usage de l'explosif devaient être parfaitement maîtrisées. Pour ce faire, les zones minées ont été désolidarisées du reste du terrain par sciage, et les avoisinants ainsi que la superstructure en cours de construction ont été instrumentés pour une auscultation permanente ;

◆ en parallèle ont été réalisés deux tunnels d'accès à l'ouvrage.

### ■ DÉCOUPAGE EN DOUCEUR DE 5 200 M<sup>3</sup> DE FALAISE CALCAIRE À L'APLOMB D'UN DES BÂTIMENTS LES PLUS PRESTIGIEUX DE LA PRINCIPAUTÉ

Le dressage de la falaise calcaire directement à l'aplomb du fleuron du patrimoine monégasque qu'est l'hôtel Hermitage requerrait les plus extrêmes précautions de manière à ne faire souffrir aucune nuisance ni aucun dommage à cet établissement. Il était donc hors de question de travailler à l'explosif ou au brise-roche hydraulique.

On a donc eu recours à la technique normalement réservée aux carrières qu'est le sciage. Ainsi la falaise a-t-elle été sciée sur 38 m de haut. Pas moins de 1 600 cubes de calcaire de 1,50 m de côté ont été sciés, dégagés au coussin hydraulique puis évacués à la grue en surplombant le boulevard en circulation. La première phase de découpe a été réalisée, comme évoqué précédemment, à partir d'un platelage à 17 m au-dessus de la voie rapide (photo 2).

Toutes les méthodes de sciage de rocher ont été

utilisées : sciage au disque, sciage au câble, sciage à la chaîne (photo 3), pour une surface totale de coupe de 23 000 m<sup>2</sup>.

Au fur et à mesure de la dépose des blocs de calcaire, la falaise était stabilisée par des clous d'ancrage à répartition dense. Ce dispositif est calculé pour stabiliser suffisamment la fondation de l'hôtel Hermitage en cas de séisme. Il comporte 600 clous totalisant plus de 6 000 m de forage (photo 4).

L'auscultation de la falaise par mesures topographiques et extensométriques n'a détecté aucun mouvement sur le nouveau profil.

**Photo 4**  
Voile en béton banché sous l'hôtel Hermitage, couvrant les 600 clous de confortement de la falaise

*Formed concrete shell under the Hermitage Hotel, covering the 600 cliff consolidation nails*



### **Bertrand Hanauer**

RESPONSABLE  
D'EXPLOITATION  
Solétanche Bachy France



### **Kim Knudsen**

INGÉNIEUR TRAVAUX  
Solétanche Bachy France



### **Lionel Abada**

DIRECTEUR  
Solétanche S.A.M.



**Photo 3**  
Scies à chaîne  
Chain saws



**Photo 5**  
Forage  
des micropieux  
*Micropile  
drilling*



**Photo 6**  
Exemple de vide karstique mis à jour  
*Example of karstic void brought to light*



**Photo 7**  
Micropieux  
et poteaux  
construits autour  
*Micropiles  
and columns built  
around*

**Photo 8**  
Butonnage  
des poteaux  
*Column staying*



## REPRISE TEMPORAIRE DES 35 000 TONNES DE SUPERSTRUCTURE

### Traitement des karsts dans la zone de scellement des micropieux

Les 35 000 tonnes de la superstructure, dalle de transfert comprise, ont été reprises provisoirement par 120 micropieux, en attendant l'achèvement de l'infrastructure (photo 5).

La zone de scellement des micropieux s'inscrivait dans un faciès de calcaire altéré présentant des vides karstiques importants (photo 6). Pour garantir la capacité portante de chaque micropieu, un traitement par injection s'est avéré nécessaire. La qualité du traitement a été vérifiée par des sondages de contrôle et par des essais d'arrachement.

### Positionnement des micropieux

Les micropieux sont positionnés de façon à être intégrés aux poteaux définitifs de la structure. L'épaisseur de ces poteaux étant de 40 cm, la tolérance d'implantation et de verticalité des micropieux était très sévère (photo 7).

Chaque micropieu a fait l'objet de contrôles inclinométriques et d'une simulation en 3D avant scellement, afin de contrôler sa position en fond de fouille soit à 15 m au-dessous de la plate-forme de travail.

### Calcul et contrôle du dispositif provisoire de fondation

Ce calcul s'est montré particulièrement complexe pour plusieurs raisons :

- ◆ la structure mixte du dispositif constitué de poteaux et de micropieux ;
- ◆ les sollicitations accidentelles difficiles à estimer comme celles résultant des tirs de mine ;
- ◆ la hauteur libre considérable du dispositif, l'exposant au flambement.

Solétanche S.A.M. s'est attaché les compétences d'un bureau de contrôle spécialisé en calcul de structures mixtes soumises au flambement.

Un dispositif de butonnage a été installé entre les poteaux (photo 8). Conformément aux spécifications de la procédure qualité, un contrôle topographique hebdomadaire de l'ensemble constitué par les poteaux et les micropieux a été effectué.

## INTÉGRATION DE RÉSEAUX SOUTERRAINS DE PREMIÈRE IMPORTANCE ET D'UNE VOIE DE COMMUNICATION RAPIDE

Une galerie technique de section 3,5 m x 3,5 m et de 60 m de long a été suspendue sous la dalle de



**Photo 9**  
Fouille en cours de terrassement, la galerie technique suspendue sous la dalle de transfert est visible en haut sur la droite

*Excavation during earthworks, the main services duct suspended under the transfer slab is visible in the top right-hand*

transition (photo 9), à l'aplomb du boulevard du Larvotto maintenu en circulation au-dessus de la dalle.

Un réseau de fibre optique ultrasensible traversant le chantier dans le sens de sa largeur a été dégagé, repris en sous-œuvre, conforté et intégré à la structure.

## ■ MINAGE EN SOUS-ŒUVRE ET EXTRACTION DES 30 000 M<sup>3</sup> DE CALCAIRE

Compte tenu du court délai imparti, seul le minage permettait de terrasser les 30 000 m<sup>3</sup> de rocher calcaire pour créer la fouille nécessaire à l'infrastructure.

Le recours au minage associé à la technique de construction "top down" est une première en Principauté de Monaco et en France (photo 10). Dans le cas de l'IM2S l'opération s'est avérée très délicate par l'addition exceptionnelle de difficultés liées à l'environnement du chantier, au minage en sous-œuvre, à la proximité des micropieux et à la construction simultanée du bâtiment en superstructure.

Les 270 tirs de mine réalisés ont nécessité l'emploi de 15 t d'explosif.

### La gestion des risques liés au minage

#### Maîtrise des vibrations

Afin de ne pas endommager les bâtiments avoisinants ainsi que la superstructure en cours de construction, de nombreuses dispositions techniques ont été mises en œuvre pour maîtriser les niveaux de vibration :

- ◆ sciage périphérique de désolidarisation préalable aux opérations de minage pour faire barrage à la propagation des vibrations vers les avoisinants ;
- ◆ désolidarisation préalable des micropieux avant minage ;
- ◆ utilisation de faibles charges unitaires et mise à feu séquentielle permettant de décaler de quelques millisecondes l'explosion des charges pour éviter la superposition énergétique. Cette méthode nécessite un maillage de forage très dense (photo 11) ;
- ◆ contrôle continu des vibrations par l'intermédiaire de 16 capteurs disposés de manière adéquate au sein du bâtiment en cours de construction et au niveau des bâtiments avoisinants. Au total, 4 300 si-



**Photo 10**  
Forage pour minage  
Drilling for blasting



**Photo 11**  
Trous de mine équipés  
Equipped blast holes

gnaux vibratoires ont été enregistrés et traités notamment par analyse des vitesses particulières avec écrêtement des signaux en fonction de leur fréquence ;

- ◆ validation quotidienne des tirs de mine et ajustement éventuel des charges unitaires en fonction des vibrations enregistrées la veille ;
- ◆ validation des procédures de minage et réalisation d'audits de contrôle mensuels par un bureau d'experts en minage.

#### Influence du minage sur les bétons de la superstructure

Une attention particulière a été apportée à l'influence des tirs de mine sur la prise des bétons

**Photo 12**  
Portique de chargement  
des camions de déblais  
*Gantry crane for loading trucks  
with earth cuts*



**Photo 13**  
Sciage de blocs dans le tunnel  
routier, une partie de la voûte  
parapluie est visible en haut

*Sawing blocks in the road  
tunnel; part of the umbrella  
arch is visible at the top*



▶ jeunes réalisés en superstructure. Une procédure préventive de minage, très contraignante, a été mise au point avec le concours d'experts. Son efficacité a été validée par des contrôles complémentaires et croisés : enregistrement et analyse des vibrations au moyen d'une base d'acquisition Sol Data, diverses analyses sur prélèvements et notamment observation de la microstructure du béton au microscope électronique, contrôle sonique.

### ■ L'ÉVACUATION DES MATÉRIAUX

Pour remonter en surface les 30 000 m<sup>3</sup> de matériaux et les charger sur camions on a eu recours à deux ensembles "portique/benne" fabriqués sur mesure et s'adaptant au centimètre près à la géométrie de la superstructure (photo 12).

Deux trémies ont été aménagées dans la dalle de transfert pour extraire quotidiennement les 500 t de rocher depuis le fond de la fouille situé entre 8 et 24 m en contrebas.

### ■ LE GÉNIE CIVIL

La partie génie civil du marché comprenait :

- ◆ 2 000 m<sup>2</sup> de béton banché pour la réalisation du soutènement haut sous l'hôtel Hermitage ;
- ◆ plus de 4 000 m<sup>2</sup> de dalle dont les 1 350 m<sup>2</sup> de la dalle de transfert ;
- ◆ 300 m de poteaux partiellement réalisés en sous-œuvre ;
- ◆ 3 000 m<sup>3</sup> de béton projeté par voie humide.

### ■ UN TUNNEL D'ACCÈS PARKING RÉALISÉ PAR SCIAGE SOUS VOÛTE PARAPLUIE

Le tunnel d'accès routier a une section de 7 m x 3 m et une longueur de 40 m.

La très faible couverture, variable de 3 à 6 m, et la proximité de constructions habitées interdisaient l'emploi d'explosif.

La dureté du calcaire dolomitique interdisait l'emploi d'une machine à attaque ponctuelle.

Le maintien obligatoire de la circulation au-dessus du tracé interdisait une solution en tranchée couverte.

La solution originale retenue a consisté à scier la section du tunnel en cubes de 1,5 m de côté à l'abri d'une voûte parapluie (photo 13) soutenue par un dispositif de cintres lourds (photo 14). La voûte parapluie a nécessité 400 m de forage (photo 15).

### ■ UN TUNNEL PIÉTONNIER À L'EXPLOSIF

Le tunnel piétonnier en terrain calcaire a une section de 3 m x 3 m et une longueur de 19 m. L'épaisseur de la couverture est de 17 m. Il a été réalisé à l'explosif (photo 16).

### ■ HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

L'exiguïté de l'emprise, le nombre (jusqu'à 9) de machines travaillant en même temps, le nombre (jusqu'à 60) de personnes au fond, le milieu confi-



**Photo 14**  
**Cintrage du tunnel routier**  
*Road tunnel arch centring*



**Photo 15**  
**Machine de forage exécutant la voûte parapluie**  
*Drilling machine executing the umbrella arch*

né, l'utilisation d'explosifs et l'activité parallèle de bâtiment en superstructure (jusqu'à 140 personnes), sont autant de facteurs qui constituaient un véritable défi en terme d'hygiène et sécurité (photo 17).

Des mesures d'un niveau élevé, en rapport avec les risques particuliers de ce chantier exceptionnellement complexe, ont été étudiées et appliquées, parmi lesquelles :

- ◆ évacuation lors de chaque tir de mine ;
- ◆ choix d'un explosif stable pour limiter le risque d'explosion accidentelle d'une cartouche non explosée par choc d'un outil ;
- ◆ contrôle des gaz libérés ;
- ◆ ventilation forcée à 23 m<sup>3</sup>/s avec contrôle conti-



**Photo 16**  
**Forages de minage au front du tunnel piétonnier**  
*Blast hole drilling at the pedestrian tunnel face*

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS

### **Soutènement**

- 36 m de haut
- 5 000 m<sup>2</sup> béton projeté
- 6 000 m de clous

### **Fondations provisoires**

- 3 000 m de micropieux
- 700 m<sup>3</sup> d'injection

### **Gros œuvre**

- 1 400 m<sup>2</sup> de dalles de transition
- 2 800 m<sup>2</sup> de planchers d'infrastructure
- 300 m de poteaux

### **Tunnels**

- 45 m – Section 6 x 3 m
- 20 m – Section 3 x 3 m

### **Sciage**

- 23 000 m<sup>2</sup> sciés
- 5 200 m<sup>3</sup> de falaise découpés en cubes

### **Terrassement**

30 000 m<sup>3</sup> minés en taube et évacués

### **Minage**

- 270 tirs
- 15 t d'explosif
- 4 300 signaux enregistrés et analysés



**Photo 17**  
**Forte densité de moyens sur un espace mesuré**  
*High density of machinery in a measured space*



**Photo 18**  
La fouille en voie d'achèvement  
*Excavation nearing completion*

nu de la teneur en oxygène et de six substances dangereuses ;

- ◆ contrôles de la qualité de l'air par des laboratoires extérieurs et notamment de sa teneur en silice ;
- ◆ formation renforcée systématique du personnel et réunions sécurité hebdomadaires ;
- ◆ sensibilisation et motivation originale en désignant chaque semaine un responsable sécurité parmi le personnel d'exécution ;
- ◆ recours à un personnel expérimenté et affecté durablement au chantier ;
- ◆ balisage et stricte gestion des circulations ;
- ◆ audit interne de sécurité chaque mois.

## ■ CONCLUSION

Un chantier complexe et difficile présente au moins cet avantage qu'il incite, encore plus qu'un autre, à une préparation soignée. Mais la meilleure des préparations ne saurait éliminer totalement l'imprévu, surtout dans le domaine de la géotechnique. Sur le chantier d'IM2S, Solétanche S.A.M. a dû ainsi adapter ses techniques et son organisation aux situations et aux contraintes qui sont apparues en cours de travaux, faisant ainsi ressortir sa forte réactivité et la puissance des moyens du groupe. Reste au bilan une performance considérée comme remarquable tant sur le plan de la technique que sur celui de la sécurité (photo 18).

## ABSTRACT

To build the Monegasque Institute of Sports Medicine on solid foundations, the building and underground works trades join forces

*B. Hanauer, K. Knudsen, L. Abada*

For construction of the Monegasque Institute of Sports Medicine, various techniques are employed which are seldom used in a property development project and even more seldom combined.

The structure comprises seven superstructure levels and seven infrastructure levels. It is constructed by the "top-down" method.

The lower part involves spectacular, complex and innovative underground works, with earthworks performed by sawing and explosives, micropiles, cement grouting, supporting structures, civil engineering and two tunnels, one of which is sawed.

Because of the cramped space on site and due to its location in a very dense and sensitive urban environment, strict precautions are taken with regard to nuisances and safety.

## RESUMEN ESPAÑOL

Para construir en emplazamiento sólido el Instituto Monegasco de Medicina Deportiva, el sector de la construcción se asocia con aquel de los trabajos subterráneos

*B. Hanauer, K. Knudsen y L. Abada*

La ejecución del Instituto Monegasco de Medicina Deportiva ha tenido que recurrir a distintas técnicas cuya presencia es muy rara en una operación inmobiliaria y aún más raramente cuando están combinadas.

La obra está formada por siete plantas en superestructura y siete plantas en infraestructura y, su realización se ha efectuado según el método denominado "top down".

La parte inferior da lugar a trabajos subterráneos espectaculares, complejos e innovadores, en los cuales se han implementado obras de explanación mediante división y explosivos, micropilotes, inyecciones, muros de contención, ingeniería civil y dos túneles, uno de los cuales está separado.

Con motivo de la exigüidad de la obra y de su ubicación en un entorno urbano sumamente denso y sensible, se han tenido que tomar estrictas precauciones en relación con las molestias y la seguridad.

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### **Maitre d'ouvrage**

SIOO

### **Assistant du maître d'ouvrage**

CMTG

### **Maitre d'œuvre - Architecte**

Cabinet Schmeltz

### **Maitre d'œuvre - BET et travaux**

OTH

### **Bureau de contrôle**

Veritas

### **Co-traitant sciage**

Vuillermin

### **Co-traitant étaielements**

Entrepose

### **Sous-traitant terrassements**

Alberti

### **Sous-traitant gros œuvre**

Richelmi

### **Bureau de conseil en minage**

DCI

# La mine d'El Teniente au Chili : beau terrain d'exercice pour spécialiste en tunnels et travaux géotechniques associés

**Soletanche Bachy Chile est riche d'une grande expérience dans les travaux miniers au Chili. L'industrie de la mine partage avec celle du pétrole des exigences très élevées en matière de rigueur technique et de sécurité. Ses fournisseurs sont strictement sélectionnés. Les travaux consistent en général en sondages carottés, tunnels et techniques associées, génie civil. Le présent article concerne la mine d'El Teniente, qui est la plus grande mine de cuivre du monde, sur laquelle Soletanche Bachy Chile a réalisé, entre autres et à ce jour, 23 km de tunnel de 16 à 49 m<sup>2</sup> de section.**

Après de longues années d'expérience dans les travaux de forage et de génie civil pour l'industrie minière, Soletanche Bachy Chile s'est décidée, en 2002, à créer sa Division Travaux Miniers. Cette entité capitalise le savoir-faire et l'expérience acquis localement dans le domaine minier en y ajoutant les compétences de sa maison mère en matière de tunnels et de travaux géotechniques. Ceci fait d'elle une entreprise intégrée pour les travaux miniers, au service de compagnies minières telles que Codelco Chile.

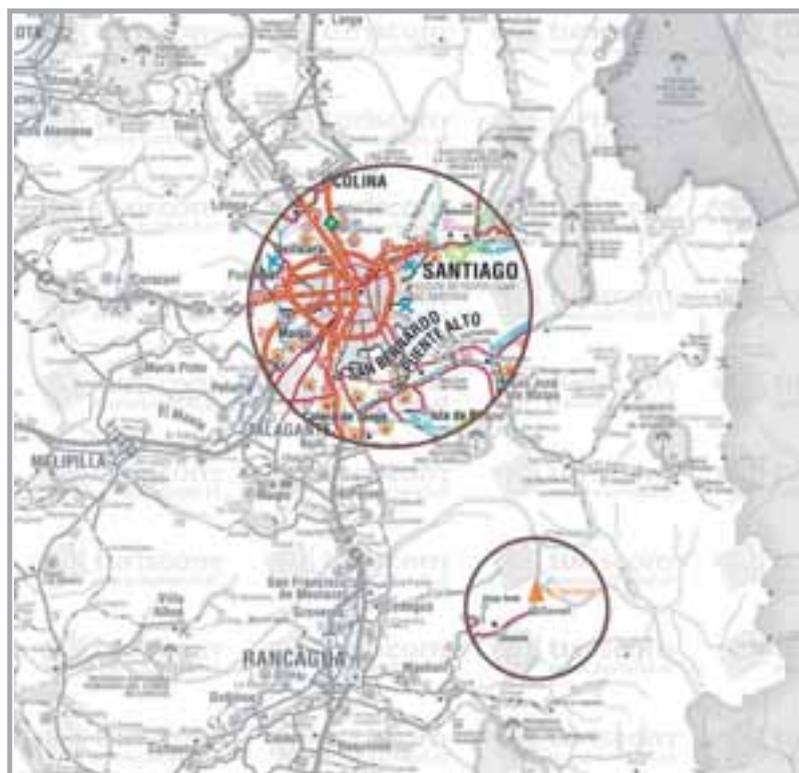
C'est dans le cadre du plan de développement des mines d'El Teniente que Soletanche Bachy Chile s'est vu attribuer successivement plusieurs contrats dans les secteurs d'exploitation appelés Mina Reservas Norte et Mina Diablo Regimiento. Avec un effectif sur site qui a atteint 900 personnes au mois de mars 2006, Soletanche Bachy Chile s'est hissée au rang des principaux entrepreneurs opérant sur El Teniente.

## ■ CODELCO CHILE

Codelco Chile (Corporación Nacional del Cobre de Chile), est une compagnie minière d'Etat qui comporte cinq divisions : Norte, El Teniente, Andina, Salvador et Ventanas.

Codelco est le premier producteur mondial de cuivre et possède près de 20 % des réserves mondiales de ce métal. En 2005, sa production s'est élevée à 1 832 000 t de cuivre et 36 567 t de molybdène, pour un chiffre d'affaires total de 10,5 milliards de dollars.

Les cinq divisions de Codelco opèrent chacune dans le cadre d'une stratégie de groupe définie et coordonnée de manière centrale au siège de la compagnie à Santiago. Elles sont en charge de leur production comprenant l'extraction du minerai et son traitement pour obtenir essentiellement du cuivre mais aussi des sous-produits tels que le molybdène dont Codelco est le plus gros producteur



**Figure 1**  
Plan de situation  
de la mine  
d'El Teniente  
*Location drawing  
of the El Teniente mine*

mondial ou encore de l'or, de l'argent et des métaux rares qu'elle exporte sur le marché mondial.

## ■ LA DIVISION EL TENIENTE DE CODELCO

La division El Teniente exploite la grande mine souterraine d'El Teniente qui est située dans les Andes à 120 km au sud de Santiago et à 2 100 m d'altitude. La ville la plus proche est Rancagua, centre administratif et lieu de séjour de la plupart des employés de la mine (figure 1).

Depuis le début de l'exploitation en 1904, plus de 2 400 km de tunnels et de galeries ont été réalisés. Une grande partie de ces tunnels a disparu du fait des différentes méthodes d'exploitation qui se sont succédé au fil des ans. En 2005 la mine d'El Teniente a produit 437 393 t de cuivre raffi-

### **Roberto Morrison**

DIRECTEUR GÉNÉRAL  
Soletanche Bachy Chile S.A.



### **Jorge Miranda**

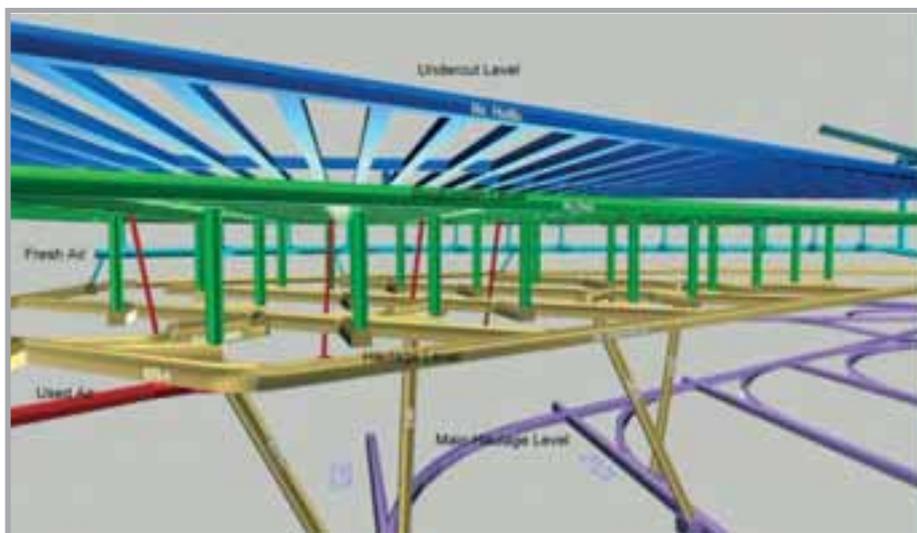
DIRECTEUR  
DE LA DIVISION TRAVAUX  
MINIERS  
Soletanche Bachy Chile S.A.



### **Gastón Diaz**

DIRECTEUR  
DES INFRASTRUCTURES  
MINIÈRES  
Codelco Chile Division  
El Teniente





**Figure 2**  
Schéma de principe de la méthode du "block caving"

*Schematic diagram of the block caving method*

**Photo 1**  
Chargeur à attaque frontale surbaissé, avec cabine pressurisée  
*Low-slung breast stopping loader, with pressurised cab*



né sous la forme de lingots obtenus par réaction cathodique et raffinage par fusion. En outre, comme principal sous-produit du procédé, 5 249 t de molybdène ont été obtenues.

Depuis 2002 la division El Teniente a ciblé son programme d'investissement sur la réalisation du "Plan de développement d'El Teniente", plus connu par son acronyme PDT, qui couvre un vaste plan industriel dans les domaines de l'exploitation minière proprement dite, mais aussi du management, de la technologie et de la finance. L'objectif de ce plan est de développer l'extraction, la concentration et la fonderie pour passer de 98 000 à 131 000 t par jour de traitement de minerai et atteindre les 450 000 t de cuivre raffiné par an en 2005.

Ce projet inclut le développement de nouveaux secteurs d'exploitation dans la mine, tels que celui qu'on appelle Diablo Regimiento ainsi que l'usage de technologies de dernière génération comme les chargeurs surbaissés télécommandés, l'augmentation de la capacité des unités de concentration et de fonderie, la mise à niveau des infrastructures pour l'approvisionnement et les services. Bien en-

tendu, tout est réalisé dans un strict respect de l'environnement.

## ■ LA MÉTHODE D'EXPLOITATION MINIÈRE

La méthode d'exploitation utilisée sur la mine d'El Teniente est celle du "block caving", c'est-à-dire de l'effondrement en masse. En raison de son coût réduit et de sa productivité, elle est appliquée principalement sur les compartiments minéralisés de grande dimension. On sous-cave sur des surfaces suffisantes pour provoquer l'effondrement naturel de la masse de minerai. L'évacuation du minerai à la base de la colonne entraîne la propagation de l'effondrement vers le haut et ceci se conduit de telle manière que tout le minerai qui était au-dessus du sous-cavage se réduit en morceaux que l'on est capable de manipuler.

Il existe bien sûr des variantes à la méthode du "block caving". Sur la mine d'El Teniente on applique celle du "panel caving", qui consiste à diviser la surface horizontale en panneaux traversant le filon et à sous-caver chaque panneau en créant des plans inclinés formant entonnoir.

Cette méthode requiert de vastes infrastructures pour atteindre le minerai, comprenant les tunnels pour l'étage de sous-cavage, un étage de production, un étage de transport, un étage de ventilation. D'autres travaux sont également nécessaires, comme par exemple la création de points de chargement et de déchargement pour les tombereaux. L'interconnexion de ces différents niveaux nécessite différents puits pour permettre les circulations verticales, la ventilation et le cheminement des utilités (figure 2). Ces différents étages sont décrits dans les paragraphes suivants.

### L'étage de sous-cavage

Cet étage est créé à la base du panneau à foudroyer, il comprend un réseau de tunnels formant une grille orthogonale. A partir de ces tunnels sont réalisés les tirs pour foudroyer les piliers réservés entre eux de manière à provoquer l'effondrement du panneau.

### L'étage de production

Il s'agit du niveau où le minerai est effectivement extrait à partir de points d'extraction et transporté au moyen de chargeurs à attaque frontale surbaissés (photo 1) jusqu'aux points de déchargement, à partir desquels il est descendu par les puits verticaux et recueilli à l'étage de transport par les tombereaux qui l'acheminent jusqu'aux concasseurs souterrains. Ce niveau est pourvu de dispositifs de soutènement plus élaborés que les autres parce qu'il est conçu pour un usage plus durable. Il

comporte une série de tunnels formant une grille dont les croisements sont aménagés pour permettre l'évolution des chargeurs. Toutes les voies sur lesquelles circulent les chargeurs jusqu'aux concasseurs primaires installés à ce niveau sont revêtues de chaussées en béton à haute résistance autorisant des vitesses élevées et ne nécessitant qu'un entretien réduit. Chaque point d'extraction comporte un soutènement rigide conçu pour encaisser les contraintes élevées résultant des effondrements développés au-dessus. Malgré sa qualité, il n'est pas rare qu'on soit obligé de réparer ce soutènement lorsque se produisent des ruptures du rocher ou d'autres phénomènes, lesquels sont observés en permanence par les spécialistes en mécanique des roches au moyen d'un dispositif d'auscultation.

### L'étage de ventilation

Cet étage comporte un réseau de tunnels formant, pour toutes les parties où des hommes travaillent, un circuit de ventilation avec injection d'air frais et extraction d'air vicié. On y compte de nombreux puits qui relient les différents étages ainsi que de grands ventilateurs.

### L'étage de transport

Le minerai, après un concassage primaire, est déversé dans les puits et arrive à cet étage où il est transporté à l'air libre par train ou par tombereaux surbaissés.

Une fois réalisées les infrastructures nécessaires, la base du panneau d'exploitation est sous-cavée par des techniques de sautage dimensionnées en rapport avec les caractéristiques géomécaniques du rocher (sa fracturation, sa dureté, ses plans de rupture, etc.) de manière à amorcer l'effondrement naturel de la roche à partir de quoi commence l'exploitation.

## ■ TRAVAUX RÉALISÉS PAR SOLETANCHE BACHY CHILE À EL TENIENTE

Les travaux, ainsi qu'une part importante de la conception, ont pour la plupart été attribués à des entrepreneurs locaux. Soletanche Bachy Chile S.A. a obtenu plusieurs contrats sur le site d'El Teniente pour le développement d'un nouveau secteur appelé Diablo Regimiento. On lui a également confié des travaux comportant une part notable de génie civil, aussi bien en travaux neufs qu'en réparations. Ces travaux sont décrits dans ce qui suit.

### Tunnels

Tous les tunnels sont exécutés classiquement à l'explosif. Leur section varie de 4 m x 4 m à 7 m x



Photo 2  
Jumbo perforant  
en front  
de taille  
*Drilling jumbo  
at working face*



Photo 3  
Machine Roboshot  
à commande déportée  
pour béton projeté  
*Roboshot machine  
with remote control unit  
for shotcrete*

7 m. Les forages sont réalisés au moyen de jumbos à un ou deux bras (photo 2) et l'explosif est de type traditionnel. Pour le marinage on utilise des chargeurs à attaque frontale surbaissés et des tombereaux surbaissés. Le type de soutènement varie en fonction des nécessités : boulons, grillage et béton projeté de 10 cm d'épaisseur appliqué au Roboshot (photo 3).

### Puits

Pour la ventilation on réalise des puits de Ø 1,50 m par la méthode du "raise-boring" qui consiste à forer un trou pilote en descendant et à l'aléser en remontant ou par la méthode "blind hole" qui consiste à forer le trou pilote et à l'aléser dans le même sens (figure 3). Des puits borgnes "blind hole" Ø 0,70 m de décharge pour le sautage sont forés au moyen de machines telles que la Robbins 52 R ou la Roger à marteau fond de trou double (photo 4, page suivante).

### Génie civil souterrain

Ces contrats prévoient différents travaux de génie civil participant à la construction de l'infrastructure souterraine : chaussées en béton haut trafic pour la circulation des chargeurs aux points d'ex-

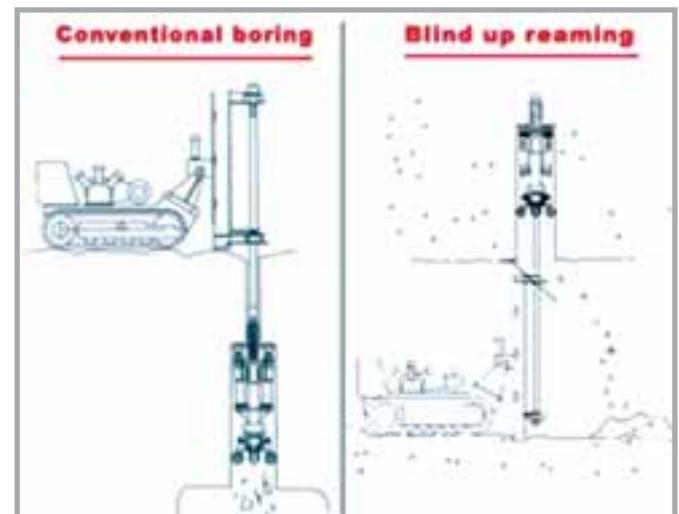


Figure 3  
Schéma des méthodes "raise boring"  
et "blind hole"  
*Diagram of the raise boring  
and blind hole methods*



**Photo 4**  
Machine Roger avec outillage marteau fond de trou double  
*Roger machine with double down-the-hole drill tool*

traction (photo 5) et soutènements lourds de tunnels. Ces contrats concernent aussi d'autres travaux de génie civil dans le domaine de la réparation des infrastructures souterraine. Tous ces travaux qui sont réalisés dans des zones à forte fracturation naturelle ou désorganisées par l'usage de l'explosif, requièrent du personnel expérimenté et respectueux des règles de sécurité.

## Quantités réalisées

Le tableau synoptique (tableau I) présente les principales quantités réalisées par Soletanche Bachy Chile S.A. dans l'exécution des contrats liés au plan d'augmentation de la production de la mine d'El Teniente, plan qui est actuellement dans sa phase finale.

Nature de travaux	Quantités	
Tunnels 4 x 4 et 7 x 7	23 000 m	437 000 m <sup>3</sup>
Puits	3 470 m	3 290 m <sup>3</sup>
Points d'extraction	266 u	
Béton armé et chaussées		17 800 m <sup>3</sup>

**Tableau I**  
*Table I*



**Photo 5**  
Soutènement lourd sur un point d'extraction  
*Heavy supporting structure on an extraction point*

## ABSTRACT

**The El Teniente mine in Chile : a fine exercise ground for a specialist in tunnels and related geotechnical work**

*R. Morrison, J. Miranda, G. Diaz*

**Soletanche Bachy Chile has a great wealth of experience in mining work in Chile.**

**The mining industry, like the oil industry, has very high demands regarding technical precision and safety. Its suppliers are selected strictly.**

**The work generally consists of core drilling, tunnels and related techniques, and civil engineering. The present article concerns El Teniente, the largest copper mine in the world, on which Soletanche Bachy Chile has executed, among other work to date, 23 km of tunnels of cross section 16 to 49 sq. m.**

**ción muy estricta. Los trabajos consisten por lo general en sondeos de reconocimientos, túneles y técnicas asociadas, ingeniería civil. En el presente artículo se describe la mina de El Teniente, que constituye la mina de cobre más importante del planeta y, en la cual Soletanche Bachy Chile ha ejecutado, entre otras y en la fecha, 23 km de túnel de 16 a 49 m<sup>2</sup> de sección.**

## RESUMEN ESPAÑOL

**La mina de El Teniente en Chile : magnífico terreno de adiestramiento para especialistas en túneles y obras geotécnicas combinadas**

*R. Morrison, J. Miranda y G. Diaz*

**Soletanche Bachy Chile posee una sólida experiencia en el sector de los trabajos mineros en Chile.**

**La industria de la mina comparte con aquella del petróleo diversas exigencias sumamente elevadas en materia de rigor técnico y de seguridad. Sus proveedores son objeto de una selec-**

# Campenon Bernard TP : quatre chantiers en cours

**Menant plusieurs chantiers dans l'Hexagone (tunnel de stockage Ivry-Masséna en Île-de-France et puits de secours de l'A86 Ouest ; tunnel routier du Bois-de-Peu dans le Doubs ; prolongement de la ligne 1 du métro de Marseille), Campenon Bernard TP (Sogea Construction – groupe VINCI) se trouvait confronté à la mi-2006 à différentes péripéties prévues ou imprévues, nécessitant parfois une adaptation des méthodes. Revue de ces complications qui sont le lot quotidien des travaux souterrains et qui sollicitent tout le savoir-faire et la détermination des mineurs.**

« Les travaux souterrains, c'est avant tout l'imprévu. » Au début de l'été, les péripéties techniques rencontrées par Campenon Bernard TP (Sogea Construction, groupe VINCI) sur certains de ses chantiers semblaient confirmer ce principe hérité de l'expérience. Pour autant, l'investissement de l'entreprise dans cette activité qui est l'un de ses métiers historiques ne se dément pas et la dynamique de synergies déjà existante avec certaines entreprises régionales de Sogea Construction (Campenon Bernard Régions, Campenon Bernard Méditerranée) ou VINCI Construction Grands Projets, s'est plus récemment élargie à GTM Construction.

"En juin dernier, indique Christophe Persoz, le directeur des travaux souterrains de Campenon Bernard TP, nous avons été déclarés adjudicataires, dans un groupement incluant également GTM Construction, du tunnel de Chavanne sur la LGV Rhin-Rhône. Complémentaires, nos entités devraient à l'avenir être en mesure de soumissionner ensemble sur d'autres projets, comme le prolongement de la ligne 12 du métro parisien entre la porte de la Chapelle et Aubervilliers ; d'autres plus lointains tels l'A89 Lyon-Balagny, les prolongements des métros de Lyon et de Paris ou le projet Lyon-Turin ; ou à plus longue échéance encore comme le prolongement du TGV vers Nice."

## ■ MARSEILLE : 1950 MÈTRES DANS UN SOUS-SOL TRÈS HÉTÉROGÈNE

À Marseille, le prolongement de la ligne 1 du métro au-delà de la station La Timone mettra le quartier de la Fourragère à moins d'un quart d'heure du Vieux-Port, et il a été attribué en juin 2005 à un groupement associant GTM GCS (mandataire), Campenon Bernard Méditerranée, Campenon Bernard TP et Spie Batignolles.

"Le projet porte sur la réalisation de quatre stations (La Fourragère réalisée dans le cadre du même marché que le tunnel, La Blancarde adjugée à un groupement conduit par GTM Construction (mandataire), Louis Armand et Saint-Barnabé, confiées à des entreprises concurrentes), de la galerie qui pour la première fois dans cette ville sera réalisée au tunnelier, et de trois puits qui sont des ouvrages de ventilation et d'épuisement", indique Alban Martinotto, directeur de projet. Lancé à l'été 2005, le chantier a commencé par la réalisation des stations, dont La Fourragère, terminus provisoire de la ligne, où le tunnelier sera assemblé à partir de fin septembre. Longue de 1950 m et d'un diamètre fini de 8,65 m (diamètre de creusement : 9,79 m), la galerie sera forée en descendant selon une pente d'environ 5 % à travers des sols hétérogènes constitués d'argiles, de sables, de sols grésifiés et de "puddingue" (conglomérat de galets et de ciment) qui ont poussé le groupement à opter pour un tunnelier à pression de terre. Et comme le creusement s'effectuera quasi exclusivement sous des zones de bâti relativement ancien (entre 60 et 100 ans) où de nombreux puits avaient été aménagés, des mesures de surveillance et de protection très rigoureuses sont prises : dans un périmètre de 10 m de part et d'autre du tracé, une campagne de comblement des anciens puits a ainsi été lancée afin d'éviter tout risque d'entraînement du sol et de fontis.

À La Fourragère où, par chance, le stockage (voussoirs, déblais et matériels divers) peut s'étendre sur une partie de l'emprise de la future rocade L2 et sur une zone réservée à l'aménagement ultérieur d'un parking de 500 places, la technique consiste à terrasser la station (soit environ 60000 m<sup>3</sup> de déblais) au brise-roche hydraulique et à ciel ouvert jusqu'à une profondeur de 25 m à l'abri d'un soutènement provisoire en paroi parisienne. L'hétérogénéité des caractéristiques du terrain a confronté ici l'équipe à de premières surprises :

### Christophe Persoz



DIRECTEUR  
DES TRAVAUX  
SOUTERRAINS  
Campenon Bernard TP

### Frédéric Dallot



DIRECTEUR DE TRAVAUX  
Campenon Bernard TP

### Patrick Gauthier



DIRECTEUR DE TRAVAUX  
Campenon Bernard TP

### Philippe Laborie



INGÉNIEUR TRAVAUX  
Campenon Bernard TP

### Alban Martinotto



DIRECTEUR DE PROJET,  
PROLONGEMENT  
DE LA LIGNE 1  
DU MÉTRO  
DE MARSEILLE  
Campenon Bernard TP

**Photo 1**  
Marseille : prolongement de la ligne de métro n° 1. La station La Fourragère, côté front d'attaque au début juillet. Le tunnelier sera mis en place à partir de septembre

*Marseilles : extension of metro line 1. The La Fourragère station, on the working face side in early July. The tunnel boring machine will be brought in from September on*



**Photo 2**  
Marseille : prolongement de la ligne de métro n° 1. Début juillet, les terrassements de la station La Fourragère (70 x 22 m avec une arrière-gare de 30 m x 10), terminus provisoire de la ligne, étaient réalisés à 80 %

*Marseilles : extension of metro line 1. In early July, the earthworks at La Fourragère station (70 x 22 m with a 30 x 10 m area behind the station), the temporary terminus of the line, were 80 % completed*



dimensionnement des tirants d'ancrage à revoir à la hausse et volume des terrains durs supérieur aux prévisions (20 000 m<sup>3</sup> contre 11 000 m<sup>3</sup> prévus).

En attendant le démarrage du creusement, Alban Martinotto, qui a dirigé les travaux du lot 2 de la ligne B du métro de Toulouse, recense d'autres difficultés prévisibles : "Les stations, ici, seront encore plus complexes à exécuter, car on retrouve le principe de dalle située à un niveau inférieur au point haut de la voûte mais aussi davantage d'ouvrages qui devront être construits après le passage du tunnelier, tels les murs de quai. Et comme chaque station est construite par un groupement indépendant, la maîtrise de la coordination sera vraiment cruciale." (cf. encadré "Prolongement de la ligne 1 du métro de Marseille" et photos 1 et 2).

## PROLONGEMENT DE LA LIGNE 1 DU MÉTRO DE MARSEILLE

### **Maitre d'ouvrage**

Communauté urbaine Marseille Provence Métropole (CUMPM)

### **Assistant maître d'ouvrage**

Systra

### **Maitre d'œuvre**

Groupement SMM

### **Bureau de contrôle**

Socotec

### **Entreprises du groupement**

GTM Construction (mandataire), Campenon Bernard Méditerranée, Campenon Bernard TP, Spie Batignolles TPCI

- Longueur de l'ouvrage : 1 950 m
- Délai contractuel d'exécution : 36 mois
- Montant des travaux : 71 M€



**Photo 3**  
Tunnel du Bois-de-Peu. Creusement en demi-section supérieure des derniers 40 m de la galerie du tunnel descendant. Pour stabiliser le front de taille, un boulonnage Swellex est réalisé sur la face éboulée. Le brise-roche opère à l'abri de la voûte où les cintres métalliques sont positionnés de mètre en mètre

*Bois-de-Peu tunnel. Driving the upper half section of the last 40 metres of gallery of the descending tunnel. To stabilise the working face, the Swellex rock bolting system is employed on the collapsed face. The rock breaker operates under the shelter of the arch where the steel centring is placed in position metre by metre*

## ■ TUNNEL DU BOIS-DE-PEU : UNE FIN DE CHANTIER SOUS HAUTE SURVEILLANCE

En juin 2005, à la veille d'attaquer le creusement des tubes du tunnel du Bois-de-Peu (deux fois 520 m) qu'emprunteront les 2 x 2 voies du contournement en voie rapide de Besançon (Doubs), Frédéric Dallot, le directeur du chantier (Campenon Bernard TP), excluait d'autant moins les surprises que l'ouvrage avait à franchir 18 unités géologiques différentes, dont des marnes nécessitant un système de soutènement par voûte parapluie, cintres métalliques et béton projeté.

"Après un creusement difficile dans des marnes du toarcien dans les 30 derniers mètres, le tube montant a été percé sans problème le 23 mai dernier. Dans le tunnel descendant, distant de seulement 30 m, les marnes que nous avons rencontrées étaient plus épaisses (40 m), plus humides et plus fracturées, et le terrassement, lancé en pleine section, a rapidement dû être suspendu en raison d'éboulements répétés survenus à partir du 5 mai." Après une étude géologique, la solution retenue a consisté à passer en terrassement en section divisée, c'est-à-dire à réduire le front de taille à 60 m<sup>2</sup> au lieu de 120 m<sup>2</sup>, en accordant une priorité à la sécurité. Progressant ainsi très lentement, parfois de seulement un mètre en une journée, le creusement de la première demi-section paraissait, à la fin juin, pouvoir s'achever vers le 20 juillet et être suivie du terrassement en sous-œuvre de la demi-section inférieure. Au même moment commençait le revêtement de la voûte du tube montant, une opération réalisée au moyen d'un coffrage métal-

lique spécial et à un tout autre rythme, puisque la cadence de bétonnage est d'un anneau de 10 m par jour (photo 3).

## ■ TIMA : UN DÉMARRAGE DIFFICILE

Venu de Toulouse, où il a creusé les 5 km du lot 2 de la ligne B du métro, le tunnelier Herrenknecht à pression de terre Carlos Gardel, d'un diamètre de 7,73 m, a été remis en état et reconditionné à Limay, près de Mantes-la-Jolie, avant d'accoster en avril dernier quai Panhard-et-Levassor (Paris XIII<sup>e</sup>), d'être rebaptisé Catherine et de démarrer sa nouvelle mission. Cette fois, il ne s'agit plus de métro mais de canalisation, et de canalisation géante puisque le futur Tima (tunnel Ivry Masséna) est destiné, par temps d'orage, à récupérer et à stocker les eaux pluviales fortement polluées, qui sans cela se déverseraient dans la Seine, et à les acheminer jusqu'à l'usine de traitement des eaux du SIAAP à Valenton (Val-de-Marne). Long de 1860 m, d'un diamètre fini de 6,80 m (diamètre de creusement : 7,78 m) et d'une capacité de stockage de 86000 m<sup>3</sup>, ce tunnel-réservoir sera creusé à une trentaine de mètres de profondeur, suivra le lit du fleuve en direction d'Ivry avant d'amorcer une légère courbe à droite sous le centre commercial Plein Ciel et de rejoindre le réseau d'assainissement francilien au puits des Cormailles.

"Ce creusement sera rendu délicat dans les premiers 300 m par une veine de sable noir sous pression d'eau, présente d'abord en section inférieure puis en pleine section et enfin en voûte, qui contrain-

**Photo 4**  
Tima (Paris), début juin. Face aux dents de la roue de coupe du tunnelier Catherine, la galerie d'amorce, 1,20 m de paroi moulée à forer et 300 m de creusement délicat dans une veine de sable sous pression d'eau

*Tima (Paris), early June. Facing the teeth of the cutting wheel of TBM "Catherine", the starting gallery, 1.20 metres of slurry wall to be drilled and 300 metres of tricky tunnel driving in a sand vein under water pressure*



© Alex Béraud

dra à travailler en pression de terre avec un confinement délicat à mettre en œuvre, pour éviter tout tassement en surface, ce qui n'est pas la configuration la plus simple", prévoit Philippe Laborie, ingénieur travaux (Campenon Bernard TP). La présence de trois ponts – pont SNCF, pont National, boulevard périphérique – sur la première partie du tracé est une raison supplémentaire de veiller aux tassements et de les maîtriser. Sur le pont SNCF, des tassomètres effectuent des relevés toutes les quatre heures. Au-delà, le terrain plus cohérent (couche marno-calcaire puis craie) rendra le creusement plus facile.

Les deux puits d'accès en paroi moulée d'un diamètre de 17 m et de 35 m de profondeur ayant été réalisés antérieurement, les opérations, pour le groupement, ont consisté cette année à creuser en traditionnel la galerie de liaison entre les deux puits (18 m), la galerie d'amorce (de janvier à mars 2006), puis à descendre les éléments du tunnelier au moyen d'un pont roulant de 45 t qui servira également à l'évacuation des déblais, et à les assembler (avril et mai). "Début juin ont été assemblés les premiers anneaux dans la jupe du tunnelier, qui, ripés vers l'arrière par les vérins de la machine, viennent prendre appui sur le bâti de poussée, pour

## SOCATOP : LES Puits DE SECOURS EN AVANCE SUR LA GALERIE

Tandis que les travaux de finition sont en cours sur les quatre puits de secours de VL1 (la section Rueil-Malmaison – échangeur avec l'A13 de l'A86 Ouest), les cinq puits de VL2, en cours de creusement entre Pont Colbert et le raccordement avec l'A13, sont commencés. "La technique n'a pas varié, explique Patrick Gauthier, directeur travaux (Campenon Bernard TP), et consiste à combiner excavation en traditionnel à l'abri d'un blindage bois dans les couches dures et paroi moulée réalisée à la benne ou à l'hydrofraise dans les sols médiocres ou saturés d'eau." Des ouvrages à réaliser en partant de Pont Colbert : puits de Porchefontaine, du RD 10, de Viroflay SNCF, du

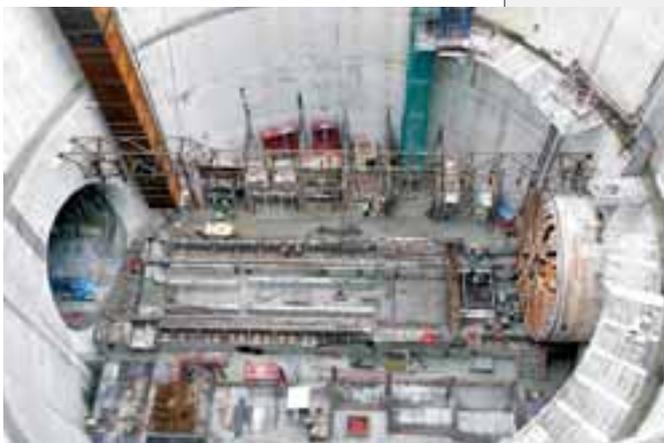
et a commencé à recevoir ses quatre niveaux de structure. Viroflay SNCF (30 m de profondeur) est creusé et son radier est bétonné ; en attendant le passage du tunnelier, qui permettra d'aménager le rameau de liaison, les équipes de tra-

vauX gagnent du temps en édifiant le local de surface. Carrousel (89 m de profondeur), réalisé en paroi moulée jusqu'à 61 m, est presque totalement excavé. Enfin, la réalisation de la paroi moulée de Prieuré (64 m de profondeur) a commencé depuis la fin mai (photos 5 et 6).



**Photo 6**  
Socatop. En surface, ce type d'ouvrage (ici avant finition) permet l'accès des secours et aux galeries du tunnel

*Socatop. On the surface, this type of structure (here before finishing) permits emergency aid access and access to the tunnel galleries*



**Photo 5**  
Socatop. Le 5 mai, le tunnelier a traversé le puits du RD 10

*Socatop. On 5 May, the TBM has passed through the shaft on county road RD 10*

Carrousel et du Prieuré (auxquels s'est ajoutée la niche 77, voisine de Porchefontaine, réalisée elle aussi en paroi moulée depuis la surface), certains sont très avancés. Porchefontaine (24 m de profondeur) et son rameau sont raccordés au tunnel.

Le RD 10 (40 m de profondeur), ouvrage particulier puisqu'il se situe exactement sur le tracé du tunnel, a été franchi par le tunnelier le 5 mai,



Photo 7

**Tima (Paris).** Le puits d'accès à la galerie, réalisé en paroi moulée, est profond de 35 m. La grue assurera l'approvisionnement des voussoirs, livrés au chantier par voie fluviale

**Tima (Paris).** The access shaft to the gallery, executed by the slurry wall technique, is 35 metres deep. The crane will bring in the segments, delivered to the site by river transport

suit Philippe Laborie. Cette phase délicate a duré tout le mois de juin. Le 26, a eu lieu le percement de la paroi moulée, épaisse de 1,20 m, qui s'est effectué en 18 heures; enfin, après un arrêt pour expertise, le chantier a redémarré le 3 juillet." (photos 4 et 7 et encadré ci-dessous "Projet Tima").

## PROJET TIMA (TUNNEL IVRY MASSÉNA)

### Maitre d'ouvrage

SIAAP

### Maitre d'œuvre

SIAAP

### Entreprises du groupement

Bouygues TP, Razel, Campenon Bernard TP, Spie Fondations

- Longueur de l'ouvrage : 1860 m
- Fin du creusement prévu en février ou mars 2007
- Effectif : 85 personnes
- Montant des travaux : 64 M€

## ABSTRACT

### Campenon Bernard TP : four projects underway

Ch. Persoz, Fr. Dallot, P. Gauthier, Ph. Laborie, A. Martinotto

Carrying out several projects in France (Ivry-Masséna storage tunnel in the Ile-de-France region and escape shaft on the A86 West motorway; Bois-de-Peu road tunnel in the Doubs region; extension of Marseilles metro line 1), Campenon Bernard TP (Sogea Construction – VINCI Group) was faced in mid-2006 with various foreseen and unforeseen incidents sometimes requiring adaptation of its methods. Review of these complications, which are the everyday lot of underground works and which call on all the miners' know-how and determination.

## RESUMEN ESPAÑOL

### Campenon Bernard TP : cuatro obras en curso

Ch. Persoz, Fr. Dallot, P. Gauthier, Ph. Laborie y A. Martinotto

Llevando a cabo varias obras en Francia (túnel de almacenamiento Ivry-Masséna en Île-de-France y túneles de emergencia de la autopista A86 Oeste; túnel viario del Bois-de-Peu en el departamento del Doubs; prolongación de la línea 1 del metro de Marsella), Campenon Bernard TP (Sogea Construction – grupo VINCI) tropezaba a mediados de 2006 con diferentes peripecias previstas o imprevistas que han precisado a veces una adaptación de los métodos. Examen de estas complicaciones que corresponden a la labor diaria de estos trabajos subterráneos y que precisan toda la pericia y experiencia práctica, así como la determinación de los mineros.

# Couvertures du boulevard Secteur de la Porte des Lilas

La Ville de Paris et ses différents partenaires (Etat et Région d'Ile-de-France) ont considéré que le principe de "couverture-dalle" constituait une opportunité de créer une continuité urbaine, au-delà des objectifs de protection phonique, dans les secteurs où le boulevard périphérique est en tranchée.

Le secteur de la Porte des Lilas est l'une des zones prioritaires faisant l'objet d'une telle opération.

Après avoir présenté les enjeux et les acteurs de ce projet, l'article décrit l'opération particulièrement délicat à cause des contraintes de sécurité, de trafic et d'exploitation.

## ■ LE CONTEXTE DE L'OPÉRATION

Le projet de couvertures du boulevard périphérique à la Porte des Lilas résulte d'une réflexion menée à l'échelle de la Région Île-de-France, au travers de documents de planification et de développement urbain ayant abouti au contrat de plan Etat-Région 2000-2006. Dans un même souci de lutte contre les nuisances sonores, ces documents ont notamment défini des orientations d'aménagement urbain auxquelles le boulevard périphérique est intégré.

La Ville de Paris et ses différents partenaires (Etat et Région Ile-de-France) ont considéré que le principe de "couverture-dalle" constituait une opportunité de créer une continuité urbaine, au-delà des objectifs de protection phonique, dans les secteurs où le boulevard périphérique est en tranchée.

Le secteur de la Porte des Lilas est l'une des zones prioritaires faisant l'objet d'une telle opération.

La couverture du périphérique dans ce secteur s'inscrit également dans le grand projet de renouvellement urbain de la couronne parisienne et qui comprend le projet de la ZAC des Lilas.

## ■ LES ENJEUX

### Réduction des nuisances acoustiques

Les améliorations attendues sont importantes. En fonction des secteurs, les réductions de nuisances vont jusqu'à 5 dB (place du Maquis du Vercors) et 11 dB (quartier Fougères). Une réduction de 3 dB correspond à une réduction de moitié de l'intensité sonore.

### Rétablissement d'une continuité urbaine Paris - Communes limitrophes

La couverture du boulevard périphérique vise à rétablir la continuité Paris-banlieue. Les espaces créés permettront de redéfinir le partage de l'espace public et notamment de créer des continuités transversales de qualité pour les circulations douces (circulations piétonnes, cyclables, etc.).

### Requalification urbaine et redynamisation des quartiers concernés

La couverture du boulevard périphérique permettra l'implantation d'équipements publics accessibles

tant pour les Parisiens que pour les riverains des communes limitrophes (dans le cadre de l'opération de zone d'aménagement concerté).

## ■ LA NATURE DE L'OPÉRATION

L'opération consiste en la construction d'une couverture lourde et la mise en œuvre de ses équipements, associée à des modifications géométriques importantes du tracé des bretelles BPE, le reprofilage des bretelles d'entrée et de sortie BPI, l'aménagement de l'avenue René Fonck et la restructuration de la place du Maquis du Vercors.

Les ouvrages de couverture sont dimensionnés pour recevoir une épaisseur de 1,50 m de terre.

Les travaux de couverture pour la tranche ferme, seule inscrite au contrat de plan 2000-2006, portent sur deux tronçons :

- ◆ le tronçon "Porte des Lilas" d'environ 360 m de long, s'étendant sur environ 115 m de part et d'autre des ouvrages existants de la place du Maquis du Vercors et comportant la couverture de l'anneau central (63 m), le linéaire des ouvrages existants étant de 65 m ;

- ◆ le tronçon "Quartier Fougères" d'une longueur d'environ 320 m s'étendant sur 70 m au nord de l'ouvrage Noisy-le-Sec et sur 70 m au sud de l'ouvrage Léon Frapié et intégrant la dalle existante du square Frapié d'une longueur de 178 m.

La réalisation des travaux a été décomposée en un **marché des travaux préliminaires** (réalisation de janvier à octobre 2005) et un **marché des travaux principaux**. Accessoirement, pour restituer au plus vite la protection acoustique existante pour les riverains les plus proches, la construction d'un écran antibruit sur la nouvelle bretelle d'entrée au BPE a fait l'objet d'un marché spécifique (mai à juillet 2005).

## ■ LES CONTRAINTES TECHNIQUES

### Sécurité

Les deux ouvrages dépassant chacun 300 m de longueur, la circulaire du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels s'applique.

De plus, à la demande des services de sécurité, les deux ouvrages sont gérés comme un tunnel unique supérieur à 800 m dans les scénarios d'urgence.

# périphérique parisien

La couverture est conçue pour répondre aux contraintes suivantes :

- ◆ construction de deux tubes séparés, indépendants et unidirectionnels ;
- ◆ la mise en place d'un dispositif de ventilation pour maîtriser :
  - la qualité de l'air en exploitation normale,
  - le désenfumage en cas d'incendie (facteur dimensionnant) ;
- ◆ la stabilité au feu des structures nouvelles et existantes ;
- ◆ la mise en place de dispositifs de sécurité pour les usagers : issues de secours, niches de sécurité, réseau d'appel d'urgence, détection automatique d'incidents, réseau incendie, signalisation dynamique... ;
- ◆ mise en place d'équipements d'exploitation : signalisation, recueil automatique des données, vidéosurveillance... ;
- ◆ mise en place d'un système de gestion technique centralisée et d'une surveillance 24 heures sur 24 assurée par un opérateur de la Ville de Paris.

## Trafic

Construit entre 1957 et 1973, le boulevard périphérique est un anneau de 35 km de longueur, qui présente les caractéristiques d'une autoroute urbaine et constitue sans conteste une infrastructure majeure de la région parisienne. A ce titre, il fait partie du réseau "magistral", défini dans le plan de déplacements urbains de la Région Ile-de-France, qui regroupe les autoroutes et voies rapides de l'agglomération (raccordement des autoroutes A1, A3, A4, A6, A13).

Le trafic moyen journalier pour les deux sens de circulation est d'environ 225 000 véhicules au nord du diffuseur d'échange de la Porte des Lilas, et de 270 000 véhicules au sud de cette même porte, valeurs exprimées en TMJA (trafic moyen journalier annuel).

## Exploitation du périphérique

Du fait même de ce trafic exceptionnel, le service d'exploitation de la Ville de Paris et la Préfecture de Police imposent un programme limitant les possibilités de restrictions de circulation autorisées. Le programme d'exploitation est donc extrêmement précis et contraignant car il est impératif que cet axe majeur conserve une capacité à drainer en sécurité un trafic minimal pendant les phases de travaux.

Ces restrictions sont de différentes natures :

- ◆ emprises réduites permanentes (réduction de largeur de voies) ;
- ◆ emprises larges permanentes (réduction du nombre de voies pouvant aller jusqu'au basculement du trafic sur une seule chaussée) ;
- ◆ fermetures de nuit à concurrence de quatre par mois et par sens permettant des travaux sous interruption de circulation ;
- ◆ interdiction de fermer plus d'une bretelle par sens de circulation.

Les restrictions d'emprises ne sont autorisées que sur des périodes de l'année figées :

- ◆ emprise réduite permanente définie par la conservation de 4 voies de circulation pour le BPE et le BPI calibrées ainsi : 2 x 3,00 m + 2 x 2,80 m autorisée sans limite sur l'année ;
- ◆ emprise large permanente définie, pour les mois de janvier, février et mars, par la conservation de 4 voies de circulation pour un sens de circulation et la réduction à 3 voies de circulation pour l'autre sens de circulation ;
- ◆ emprise large permanente définie, pour les seuls mois de juillet et d'août, par la conservation de 4 voies de circulation réduites pour un sens de circulation et la réduction à 2 voies de circulation pour l'autre sens de circulation, ou, en dérogation, réduction à 3 voies de circulation réduites pour le BPE et le BPI ;
- ◆ durant la période entre le 2 et le 25 août, fermeture d'une chaussée avec basculement sur une seule chaussée des deux sens de circulation (2 x 2 voies).

Le recours à l'ensemble de ces restrictions doit faire l'objet de demandes auprès de l'exploitant de la Ville de Paris.

Le planning élaboré au mois (m-2) n'est pas modifiable et doit être validé par l'exploitant en coordination avec les services exploitants des Autoroutes A1 et A3, le SISER et la Préfecture de Police dans le cadre d'une coordination régionale.

Dès la phase conception, ce contexte particulier a nécessité l'établissement d'un planning extrêmement détaillé pour déterminer le délai envisageable pour la réalisation de l'ouvrage.

Plus encore, dès la fin de la phase AVP, l'extrême sensibilité de la planification de ce projet a été mise en évidence. En effet, le planning prévisionnel est obligatoirement élaboré en tenant compte des "fenêtres des restrictions autorisées" et doit, par conséquent, se caler sur des dates précises. Dès lors qu'un événement survient qui ne permet pas le respect de ces fenêtres, les tâches envi-

## Carine Bernede



CHEF DE LA DIVISION  
DES COUVERTURES  
DU BOULEVARD  
PÉRIPHÉRIQUE  
Ville de Paris - Direction de la  
Voirie et des Déplacements

## Faiz Belblidia



DIRECTEUR DE PROJET  
Scetauroute (Groupe Egis)

## Eric Cheype

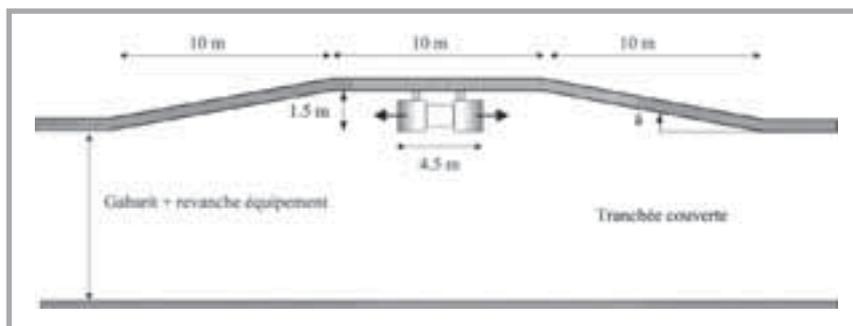


CHEF DE SERVICE  
TRAVAUX  
Bouygues TP



**Photo 1**  
Ripage des GBA de chantier lors d'un changement de restriction de circulation  
*Sliding construction site concrete safety barriers to change traffic restrictions*

**Figure 1**  
Détail  
de bossage  
*Detail  
of an anchor  
block*



► sagées sont repoussées jusqu'à la prochaine restriction permise.

Une tâche nécessitant par exemple une emprise importante en TPC, se traduisant par une restriction large avec réduction du nombre de voies, prévue au premier trimestre de l'année et qui n'a pu être achevée pendant cette période ne pourra être reprise que lors de la restriction d'emprise large suivante, durant les mois de juillet et août.

Un retard de quelques jours dans certaines tâches peut ainsi conduire à un retard de plusieurs semaines.

Le risque d'amplification des retards et de désorganisation importante du chantier est une contrainte permanente et spécifique de ce projet qui nécessite une extrême rigueur dans la préparation des moyens, la mise en œuvre de mesures de sécurisation (matériel complémentaire...) et le suivi.

Enfin, les changements de restriction de circulation interviennent obligatoirement de nuit pour permettre

la mise en place et/ou le ripage des dispositifs de protection ainsi que du marquage au sol provisoire. De plus, le comptage du trafic existant sur le périphérique doit être assuré quelle que soit la phase de restriction ce qui nécessite la mise en place de boucles de comptage provisoires (photo 1).

## Aménagements de surface

Une des contraintes particulières du projet de couverture du boulevard périphérique sur le secteur "Lilas" réside dans l'existence d'une vaste zone d'aménagement concerté dont le projet est mené en parallèle.

La coexistence de ces deux projets tant pour les phases études que pour les phases travaux génère des interfaces importantes et des contraintes bilatérales.

L'ouvrage de couverture proprement dit est destiné à recevoir dans sa majeure partie un traitement paysager arboré sur une épaisseur de terre de 0,70 m à 1,50 m ainsi que des équipements sportifs (terrains de tennis...) à l'exclusion de tout bâti.

## Zone Lilas

La place du Maquis de Vercors est réaménagée pour retrouver le tracé linéaire de l'avenue de la Porte des Lilas. Une partie de la dalle de l'ouvrage neuf dans son raccordement avec les ouvrages routiers existants supportera en conséquence un trafic routier pour lequel elle devra être dimensionnée.

Immédiatement au sud de la place du Maquis de Vercors, est prévue l'implantation d'un terminal pour bus. Dans cette zone, la structure de la couverture sera dimensionnée pour tenir compte des charges roulantes correspondantes.

Au-delà, la dalle de couverture recevra les trois chapiteaux du cirque du Grand Céleste.

## Zone Fougères

Sur la dalle existante, le square Frapié fait l'objet d'un aménagement paysager spécifique.

Les zones nouvellement couvertes traitées en cohérence avec cet aménagement reçoivent des équipements sportifs s'insérant dans un aménagement paysager global.

## Géométrie

Cette concomitance des projets de couverture et d'aménagement de surface a généré une contrainte géométrique particulière puisque l'épaisseur structurelle maximale était de fait déterminée par une double obligation : le respect du dégagement d'une hauteur libre sous ouvrage de 5 m et le respect des nivellements de surface existants et définis par les aménageurs.

Cette contrainte est amplifiée dans certaines zones par les équipements à mettre en œuvre et en particulier les bossages devant recevoir les accélérateurs (figure 1).

## Franchissement de la ligne 11 du métro

La conception de l'ouvrage tient compte du franchissement de la ligne du métro perpendiculairement au boulevard périphérique au droit de la place du Maquis du Vercors. Dans la zone de franchissement du métro, sur une longueur de 15 m, les piédroits ne sont plus fondés sur pieux mais sur une semelle superficielle et sont encastrés de part et d'autre sur des piédroits fondés sur une double file de pieux. Au-dessus du métro, les piédroits constituent donc des poutres voiles en "T" inversé qui reportent leurs charges respectives de part et d'autre de la zone ainsi "pontée".

Préalablement à la réalisation des travaux, il y a eu constat contradictoire de l'état des lieux et la RATP a mis en place un système de surveillance avec des mesures de convergence régulières de l'intérieur de la voûte concernée par les travaux.

Il n'y a pas eu d'incidence en phase de réalisation et l'ouvrage de couverture n'apporte aucune sollicitation supplémentaire à l'ouvrage du métro (figure 2).

## Réseaux divers

L'ouvrage étant dans un site très fortement urbanisé, outre les réseaux d'exploitation du boulevard périphérique (gestion du trafic et éclairage), il existe de très nombreux réseaux :

- ◆ réseaux d'assainissement du BP et des voiries de surface constitués d'ovoïdes exploités et entretenus par la SAP (Section d'assainissement de Paris);
- ◆ adduction eau (Eau de Paris, CEP);
- ◆ transport électricité (225 kV et 63 kV) EDF - RTE et distribution EDF;
- ◆ assainissement interdépartemental - SIAAP;
- ◆ transport hydrocarbures - TRAPIL;
- ◆ transport et distribution de gaz - GDF Transport et GDF;
- ◆ télécommunications (divers opérateurs de téléphonie fixe et mobile);
- ◆ éclairage public des voiries connexes - EUREC;
- ◆ signalisation lumineuse tricolore des voiries connexes - GECIR;
- ◆ réseau d'alimentation électrique - RATP.

En outre, le boulevard périphérique dispose de réseaux de courants forts et faibles en TPC pour la gestion du trafic (RAU, vidéosurveillance, PMV...). Si les réseaux principaux du périphérique ont été dévoyés dans le cadre des travaux préliminaires, l'ensemble de ces réseaux a constitué une contrainte forte à la fois en terme de procédure et également en terme de coordination des co-activités.

## Ouvrages existants

Le projet de couverture se caractérise par la présence d'ouvrages existants de différentes natures

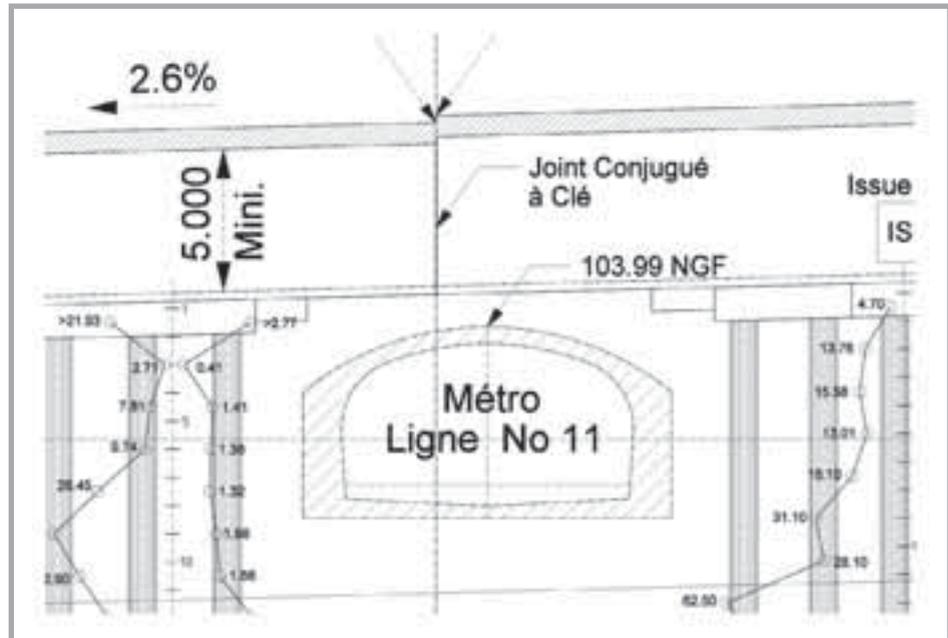


Figure 2  
Schéma du franchissement de la ligne 11 du métro  
Diagram of the metro line 11 crossing

qui ont dû être intégrés à l'ouvrage projeté ou démolis partiellement ou totalement.

Dans la zone de la "Porte des Lilas" les deux ouvrages routiers existants formant l'anneau du giratoire ont fait l'objet d'une démolition partielle par sciage des encorbellements et ont été intégrés aux ouvrages de couverture. La voirie principale dans cette zone est ainsi totalement remaniée suivant le projet d'aménagement de surface par la suppression du giratoire au profit d'une avenue rectiligne et d'une vaste esplanade.

Dans la zone du "quartier Fougères", les deux ouvrages routiers des rues Noisy-le-Sec et Léon Frapié, encadrants la dalle existante du square Frapié, n'ont fait l'objet que de déposer de leurs équipements (corniches et garde-corps) pour être intégrés à l'ouvrage de couverture.

Les appuis centraux de tous ces ouvrages ont dû faire l'objet de travaux pour les transformer en voiles continus et assurer la séparation effective des deux sens de circulation en deux tubes séparés (photo 2). Pour ce qui concerne les différents murs de soutènements, leur dimensionnement n'a pas permis une réutilisation comme support éventuel de couverture.

Ils sont soit totalement démolis soit utilisés pour leur seule fonction de soutènement des terres, l'appui des dalles de couverture se faisant sur des fondations et piédroits de faible hauteur réalisés à l'arrière de l'existant. Dans ce cas, les murs existants sont rehaussés pour combler le vide devant les piédroits de la couverture.

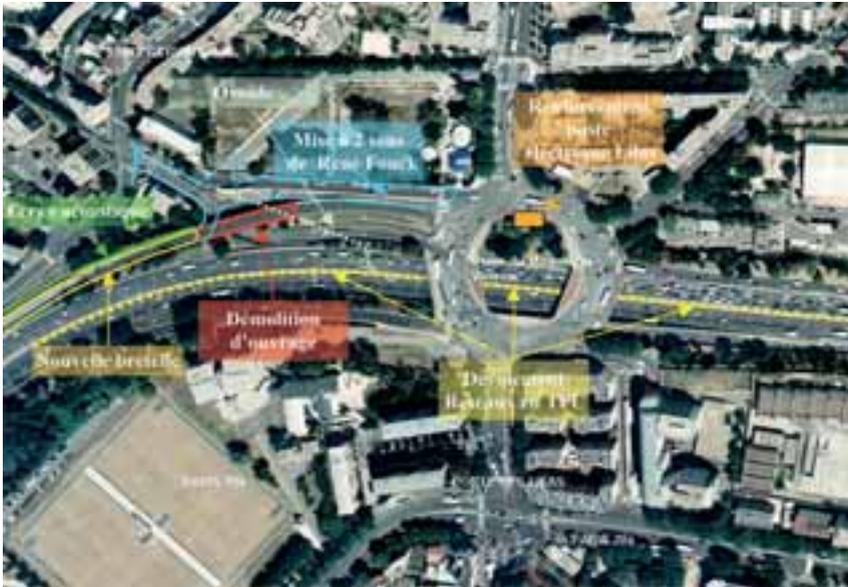
## Vue synthétique des travaux préliminaires

Les travaux préliminaires ont essentiellement porté sur le dévoiement des réseaux d'exploitation de l'ensemble des équipements du boulevard périphérique transitant dans le terre-plein central pour libérer cet espace et permettre la construction des appuis centraux de la couverture et celui d'un ovoïde d'assainissement sous les chaussées du périphérique.



Photo 2  
Intervention sur piédroits existants  
Work performed on existing side walls

**Photo 3**  
**Vue synthétique**  
**des travaux**  
**préliminaires**  
*Synthetic view*  
*of preliminary works*



En outre ont été entrepris la démolition d'un ouvrage d'art important portant la bretelle d'entrée au périphérique extérieur et la reconstruction de celle-ci selon une nouvelle géométrie ainsi que l'aménagement provisoire de l'avenue René Fonck et sa mise à double sens.

En parallèle un écran acoustique de 260 m de long et 4 m de hauteur a été réalisé avec une géométrie sans ressauts, adaptée au profil au long de la bretelle d'entrée au BPE (photos 3 à 6).



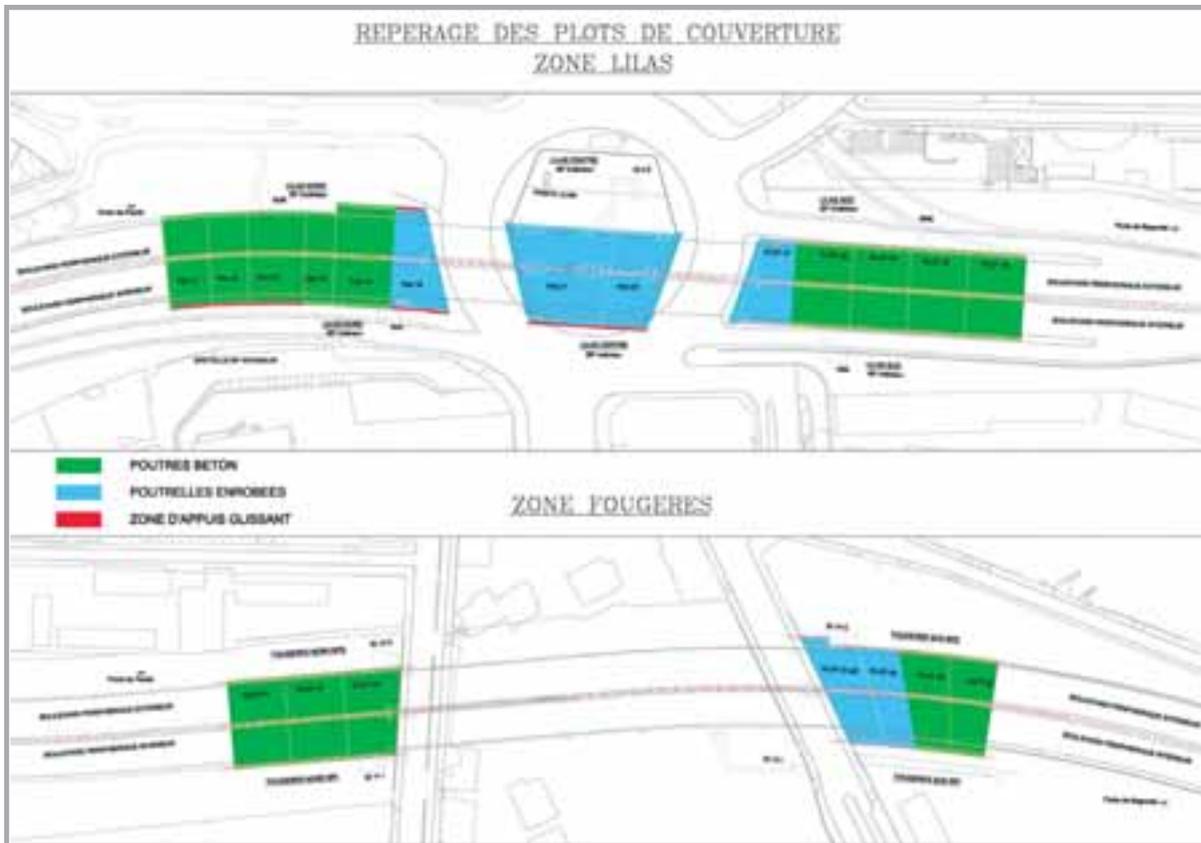
**Photo 4**  
**Vue de l'écran acoustique**  
**démoli**  
**dans le cadre**  
**des travaux principaux**  
*View of the noise barrier*  
*demolished*  
*as part of the main works*



**Photo 5**  
**Ouvrage en cours**  
**de démolition**  
*Structure*  
*being demolished*

**Photo 6**  
**Nouvel écran**  
**et nouvelle bretelle**  
*New barrier*  
*and new slip road*





**Figure 3**  
Repérage des plots de couverture zones Lilas et Fougères

Locating the cover markers for the Lilas and Fougères areas

## ■ TRAVAUX PRINCIPAUX

### Caractéristiques de l'ouvrage de génie civil

#### Conception générale

La structure retenue à l'issue de la phase de conception pour la réalisation de la couverture du boulevard périphérique est du type portique ouvert double fondé sur pieux dont la traverse supérieure est de type poutrelle enrobée.

La consultation a été lancée sur la base de cette solution avec l'ouverture aux variantes de structures préfabriquées pour ce qui concerne la dalle de couverture.

Pour les travaux, une solution "mixte" a été proposée par l'entreprise et adoptée : la structure retenue conserve la solution de type "poutrelles enrobées" pour toutes les zones biaisées ou radiales et met en œuvre une solution alternative de type "poutres-dalles" pour toutes les zones courantes. Les portées sont comprises entre 16,50 m et 20,65 m pour la travée couvrant le périphérique extérieur et entre 16,50 et 22,50 pour la travée couvrant le périphérique intérieur.

#### Fondations

A l'exception de la zone de franchissement de la ligne 11 du métro, l'ensemble des appuis est fondé profondément par le biais de 440 pieux Ø 1000 et 1200 mm. Les piédroits sur lesquels s'encastrent les voiles situés au-dessus de la ligne 11 du métro sont fondés sur des pieux Ø 1400 mm. Les voiles situés au-dessus de la ligne du métro ne sont pas fondés et n'exercent aucun report de charges sur la voûte de celui-ci.

La profondeur moyenne des pieux est d'environ 20 m.

#### Appuis

Tous les appuis ou piédroits de l'ouvrage de couverture du boulevard périphérique sont constitués de voiles en béton armé d'épaisseur de 0,80 m. Dans la zone de couverture de la bretelle de sortie du périphérique intérieur, le piédroit commun, de même épaisseur, reçoit des corbeaux pour l'appui des poutres côté BP.

Le piédroit extérieur de la bretelle est d'une épaisseur de 0,50 m.

#### Dalles de couverture

La dalle de couverture du périphérique est décomposée en plots constitués, selon leur configuration, de poutrelles enrobées ou de poutres-dalles.

La dalle de couverture de la bretelle de sortie du périphérique intérieur est en poutres-dalles.

La traverse supérieure au-dessus du boulevard périphérique a une épaisseur totale de 0,80 m. La traverse supérieure au-dessus de la bretelle a une épaisseur de 0,50 m.

Ces plots sont soit totalement encastrés soit encastrés sur le piédroit central et appuyés sur les piédroits latéraux, en fonction de la configuration de l'ouvrage (symétrie des aménagements, hauteur des piédroits...).

La figure 3 décrit cette décomposition en plot et le schéma statique associé.

#### Matériau de protection coupe-feu

La totalité des dalles de couvertures (ouvrages neufs et ouvrages existants) reçoivent une protection coupe-feu constituée de plaques de 25 mm



**Photos 7 et 8**  
**Pose des plaques de protection coupe-feu**  
*Laying fire-resistant protection plates*



► d'épaisseur et garantissant une tenue de deux heures sous un feu hydrocarbures (niveau N2) (photos 7 et 8).

### **Murs antirecyclage**

Les piédroits centraux de chaque couverture sont prolongés de 40 m à chaque extrémité par des voiles de 0,65 m d'épaisseur. Ces voiles ne supportent aucune charge et sont fondés superficiel-

lement (exception faite d'un plot franchissant l'aqueduc de la Dhuis encadré par des pieux).

La ventilation se fait généralement dans le sens du trafic et, en cas d'incendie, les accélérateurs poussent la fumée vers la sortie. Ces murs ont pour fonction d'empêcher les retours des fumées dans l'autre tube (photo 9).

### **Ouvrages annexes**

Outre les ouvrages principaux de couverture, des ouvrages annexes sont réalisés. Il s'agit :

- ◆ des postes électriques enterrés dont l'un, nouveau, est situé au-dessus de la voûte du métro, et l'autre, en bordure de la rue Noisy-le-Sec et du square Frapié, a fait l'objet d'une extension importante. Ils sont destinés à recevoir les postes de transformation et les équipements d'alimentation électrique de l'ensemble des équipements de la couverture (ventilation, signalisation, éclairage du tunnel...);

- ◆ des issues de secours : il y en a neuf dont l'implantation tient compte à la fois des impératifs de sécurité en terme d'interdistance et de débouché et des contraintes d'insertion dans les aménagements de surface (photos 10, 11 et 12).

## **LES PRINCIPAUX INTERVENANTS**

### **Maître d'ouvrage**

Ville de Paris. Conduite d'opération assurée par la direction de la Voirie et des Déplacements - Service des Aménagements et des Grands Projets – Division des Couvertures du boulevard périphérique

### **Maître d'œuvre**

Groupement constitué par Scetauroute (Groupe Egis) (mandataire du groupement de MOE Scetauroute/Thalès/Berim/Isis/Barbier Architecte) :

- **Scetauroute** : Direction de projet et coordination
  - Génie civil 1 : secteur Porte des Lilas
  - Sécurité tunnels
  - Ventilation et désenfumage
- **COTEBA** (ex Thalès Engineering et Consulting) :
  - Génie civil 2 : secteur Fougères
  - Alimentation électrique & éclairage
  - Gestion technique centralisée
- **Isis (Groupe Egis)** : Equipements dynamiques
- **Berim** : Voiries, assainissement & réseaux
- **Barbier** : Architecture & paysage

### **Entreprises**

- Travaux préliminaires : groupement constitué par Eurovia Ile-de-France S.N.C (mandataire)/Valentin/SDEL Infi/Amec Spie/Cardem/MCCF
- Travaux d'écran acoustique : Sysa
- Travaux principaux : groupement constitué par Bouygues TP (mandataire)/Eurovia/SDEL Infi

## **LES PRINCIPALES QUANTITÉS**

### **Fondations**

- 440 pieux Ø 1 000, 1 200 et 1 400 mm
- Profondeur moyenne : 20 ml
- 3 ateliers de forage avec une foreuse et une grue sur chenille
- Cadence de 2 pieux réalisés par jour

### **Blindage (piste accès et ouvrages)**

4 500 m<sup>2</sup> d'une hauteur moyenne de 3 m

### **Voiles : (semelles et piédroits)**

- 15 000 m<sup>3</sup> de béton, épaisseur moyenne : 80 cm
- 3 500 t d'acier
- 25 000 m<sup>2</sup> de coffrage et 3 outils spécifiques : grue mobile 80 t
- Cadence : 36 m de piédroits tous les deux jours

### **Couverture**

- 17 000 m<sup>2</sup> de couverture de 75 cm d'épaisseur
- 5 500 m<sup>2</sup> en poutrelles acier (1 800 t)
- 11 500 m<sup>2</sup> de poutres en béton précontraintes (650 unités de longueur moyenne de 23 m)
- 14 000 m<sup>3</sup> de béton armé coulé en 2<sup>e</sup> phase
- Deux grues spéciales de 120 et 160 t
- Cadence : 10 poutres par nuit, avec 8 coupures de circulation par mois



**Photo 9**  
Murs anti-recyclage  
*Anti-recycling walls*



**Photo 10**  
Poste électrique Lilas  
*Lilas electric substation*



**Photo 11**  
Aspects architecturaux : tête de couverture Lilas Nord  
*Architectural aspects : Lilas North cover portal*



**Photo 12**  
Tête de couverture Lilas Sud  
*Lilas South cover portal*

## ■ CARACTÉRISTIQUES DES ÉQUIPEMENTS

Au sens de la circulaire, en tranche ferme, les tranchées couvertes du secteur de la Porte des Lilas (tranchée couverte des Lilas et tranchée couverte du quartier Fougères) sont classées de la manière suivante :

- ◆ tunnels urbains ;
- ◆ trafic non faible ;
- ◆ deux tubes unidirectionnels ;
- ◆ longueurs supérieures à 300 m ;
- ◆ gabarit supérieur à 3,50 m ;
- ◆ interdiction aux transports de matière dangereuse, de produits explosifs ou facilement inflammables ;
- ◆ mode d'exploitation de degré D4, correspondant à une surveillance humaine permanente.

Le présent projet prend en compte les mesures conservatoires nécessaires à la réalisation de la tranche conditionnelle qui correspond à la réalisation d'un ouvrage classé dans les tunnels de longueur supérieure à 1 000 m.

L'ensemble des équipements projetés est conforme aux prescriptions réglementaires.

L'aspect "équipements" fera l'objet d'un développement dans un article spécifique.

Il est seulement précisé ici que l'étude réalisée en tenant compte de la tranche ferme et de la tranche conditionnelle a permis de déterminer le choix du type de ventilation et de dimensionner les équipements de ventilation.

Le type de ventilation retenue est la ventilation longitudinale.

Compte tenu des dispositions de la circulaire ministérielle 2000-63 ainsi que des recommandations de l'AIPCR de 1999 et des longueurs des différents projets, le phasage de construction de la couverture en tranche ferme et conditionnelle induit :

- ◆ la mise en œuvre d'accélérateurs pour la première phase ;
- ◆ complétés en deuxième phase par la mise en œuvre d'une usine d'extraction commune aux deux sens de circulation, usine qui ne sera réalisée que dans le cadre de la tranche conditionnelle.

## ■ ORGANISATION DES TRAVAUX

L'exécution du chantier nécessite dix grandes phases de balisage du périphérique comprenant des tâches précises à réaliser dans des délais tendus, face aux impératifs d'exploitation du périphérique.

Outre ces phases de balisage ou de restriction de trafic permettant les travaux de jour, des nuits de fermeture sont nécessaires (huit nuits par mois, dont quatre sur le BPE et quatre sur le BPI) pour

permettre les travaux de pose des poutres de couverture ainsi que des interventions spécifiques (démolition, pose des cages d'armatures, déplacement des portiques et banches de coffrages...).

Enfin, les travaux de surface, après exécution de la couverture de l'anneau de Lilas Centre nécessitent un phasage complexe coordonné avec les interventions des concessionnaires et les travaux réalisés dans le cadre du projet d'aménagement de la ZAC des Lilas.

Des calendriers à des stades différents entre projets distincts et des contraintes spécifiques rendent parfois l'exercice d'autant plus difficile qu'il s'exerce sur des emprises restreintes mais nécessairement partagées.

L'ensemble de ces contraintes induit une forte complexité dans l'organisation des travaux. Le respect de délais tendus à chaque phase nécessite la mise en place de moyens importants (matériels et humains) sinon redondants pour pallier les aléas que peut comporter un projet urbain sous circulation (réseaux, manifestations...).

Le chantier, dans sa période de pointe, comporte un effectif de plus de 200 personnes (cf. tableau I).

Entreprises	Effectif moyen	Effectif en pointe
Bouygues Travaux Publics	80	120
SDEL Infi	25	60
Eurovia Ile de France	15	50

**Tableau I**  
**Composition de l'effectif**  
*Workforce composition*

## ABSTRACT

### Coverage of the Paris ring road. Porte des Lilas sector

*C. Bernede, F. Belblidia, E. Cheype*

**The City of Paris and its various partners (central government and Ile-de-France region) considered that the "cover slab" technique was an opportunity to create urban continuity, in addition to the noise protection objectives, in those sectors where the ring road is a trench road.**

**The Porte des Lilas sector is one of the priority areas for such work.**

**After presenting the issues at stake and the stakeholders in this project, the article describes the project works, which are extremely difficult due to safety, traffic and operating constraints.**

## RESUMEN ESPAÑOL

### Coberturas de la vía de circunvalación de París. Sector de la Porte des Lilas

*C. Bernede, F. Belblidia y E. Cheype*

**La Villa de París y sus distintos entes asociados (Estado y Región Ile-de-France) han considerado que el principio de "cobertura-loza" constituye una oportunidad para crear una continuidad urbana, más allá de los objetivos de protección acústica, en los sectores en que la vía de circunvalación ya se encuentra excavada.**

**El sector de la Porte des Lilas constituye una de las zonas prioritarias que está objeto de semejante operación.**

**Tras haber presentado los retos y los actores de este proyecto, se describe en el presente artículo la operación particularmente delicada con motivo de los imperativos de seguridad, de tráfico y de explotación.**

# Aménagement hydroélectrique en Pyrénées-Atlantiques : projet de La Verna

**Laurent Viguier**

DIRECTEUR  
HC Pyrénées

**Bernard Bertuola**

INGÉNIEUR SNCF  
CHEF DE PROJET  
DE L'AMÉNAGEMENT  
HYDROÉLECTRIQUE DE LA VERNA  
Société Hydroélectrique du Midi (S.H.E.M.)

**La société HC Pyrénées, une société du Groupe HC, réalise actuellement pour le compte de la S.H.E.M. (Société Hydroélectrique du Midi) filiale de la SNCF, une partie d'un aménagement hydroélectrique dans le département des Pyrénées-Atlantiques, sur la commune de Sainte-Engrâce (Pays Basque).**

**Ces travaux consistent en la réalisation d'une adduction en tuyauterie fonte de 600 mm de diamètre, enterrée dans le radier d'une galerie souterraine existante, de 660 m de long, dont l'exiguïté complique les travaux.**

**E**n préalable à ces travaux, il a fallu purger et conforter la galerie par boulonnage, béton projeté fibré et injection des zones sensibles, et ce, afin de procéder notamment à l'excavation de la tranchée par minage.

Le marinage, partie délicate également dans une galerie de si petite section, est effectué à l'aide d'une marineuse type Scoop Wagner. Les prétrassements sont réalisés avec des mini-pelles type U15 et U20.

Actuellement, HC Pyrénées procède à la pose des tuyauteries DN 600. A l'issue de ces travaux, sera mise en œuvre une dalle de béton de protection sur la tuyauterie, qui permettra une évolution sécurisée des spéléologues en sortie du réseau de la Pierre-Saint-Martin, mais aussi des touristes dans le cadre d'un futur aménagement touristique pour la visite du site de La Verna.

Le conducteur d'opération de la S.H.E.M., Bernard Bertuola, responsable de ce projet, décrit ici les principales étapes de cet aménagement hydroélectrique, l'une des rares réalisations de ce type dans les Pyrénées françaises au cours des dix dernières années.

## ■ UNE GÉOMORPHOLOGIE TRÈS SPÉCIFIQUE

Aux confins de la France et de l'Espagne, entre Aragon, Béarn et Soule, s'étend la Pierre-Saint-Martin (64). Ce massif de 140 km<sup>2</sup> est le siège de phénomènes karstiques de grande ampleur. Plusieurs de ses gouffres figurent parmi les plus profonds du monde.

Deux phénomènes sont à l'origine de leur formation :

◆ le massif est constitué de calcaire, une roche cassante, fissurée sous les contraintes tectoniques, et perméable posée sur des schistes imperméables ;



Entrée de la galerie souterraine existante, longue de 660 m

Entrance of the existing underground gallery, 660 metres long

◆ l'écoulement des eaux de pluie chargées en acide carbonique a dissous le calcaire, formant des réseaux hydrologiques souterrains s'écoulant sur la couche imperméable vers le nord-ouest en direction de la commune de Sainte-Engrâce.

## ■ UN PROJET AMORCÉ DE LONGUE DATE

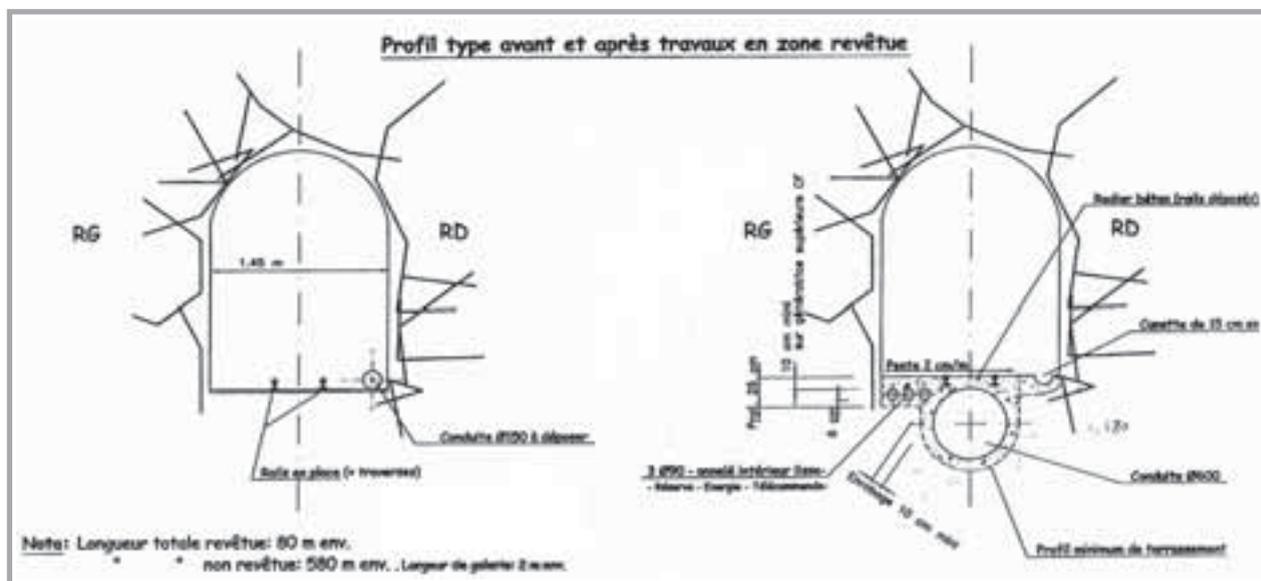
Dès 1930, une expédition menée par Max Cosyns permet de comprendre l'ampleur de ce massif et surtout son fabuleux potentiel de découvertes.

L'après-guerre amène de nouveaux équipiers plus jeunes et mieux équipés. C'est le temps des expéditions lourdes dans le gouffre de la Pierre-Saint-Martin.

En 1951, le puits Lépineux, profond de plus de 300 m, est descendu.

En 1952, à la découverte de la rivière souterraine, Jacques Labeyrie, descendu en compagnie de Marcel Loubens et Haroun Tazieff, imagine un aménagement hydroélectrique ; à la remontée du puits Lé-

Profil type avant et après travaux en zone revêtue  
 Typical profile before and after work in a lined area



pineux, Marcel Loubens effectue une chute mortelle devant la caméra d'Haroun Tazieff.

En 1953, la gigantesque salle de La Verna, de 3,4 millions de m<sup>3</sup>, (200 m de diamètre, 190 m de haut) est découverte à plus de 700 m de profondeur.

En juin 1956 l'entreprise Castells de Tarbes (65) – sous-maîtrise d'ouvrage EDF – commence le creusement d'un tunnel afin de capter la rivière souterraine à l'amont de la salle La Verna. La galerie débouchera dans la salle le 20 décembre 1960 avec quatre ans de retard.

Pendant ces quatre années de chantier, la galerie changera plusieurs fois de direction, plusieurs branches seront abandonnées, le réseau d'Arpidia (25 km) sera découvert et une expédition topographique franco-espagnole sera organisée à partir du puits Lépineux afin de préciser la position de la salle.

La mesure des débits de la rivière souterraine est effectuée pendant plusieurs années par EDF et par l'ARSIP (Association de recherche spéléologique internationale de la Pierre-Saint-Martin). Le projet hydroélectrique est abandonné et la galerie est remise à la commune de Sainte-Engrâce et aux spéléologues.

Dans les années quatre-vingt-dix, la S.H.E.M. étudie à son tour un projet d'aménagement hydroélectrique. Ces études permettent en particulier de déterminer les communes propriétaires des tréfonds (prise d'eau, salle et galerie) et aboutissent à la signature en 2003 d'une convention avec les trois communes (Sainte-Engrâce, Arette et Aramits) concernées par l'aménagement et réunies dans un SIVU. Les trois communes sont favorables au projet, sous réserve qu'il ne crée aucun obstacle à une exploitation touristique ultérieure.

En 2004, une demande d'autorisation est déposée auprès de l'administration dans le but d'utiliser les débits de la rivière souterraine de Saint-Vincent, entre les altitudes 1077,50 NGF et 547,00 NGF, afin de produire de l'électricité, dans une usine qui sera située à l'aval de la confluence du ravin d'Ehujare et de la rivière de Sainte-Engrâce, 2 km en amont des gorges de Kakouetta.

## LES CARACTÉRISTIQUES D'UN PROJET HORS NORME

La prise d'eau est constituée d'un barrage de 4 m de haut, d'une prise latérale munie de grilles et d'une vanne de dégrèvement. L'évacuation des crues se fait par déversement.

La conduite forcée d'un diamètre de 60 cm, qui emprunte la salle de La Verna sur 100 m (dont 70 m en falaise), est enterrée dans le radier de la galerie sur 660 m puis enfouie à l'extérieur de la galerie sur 2800 m jusqu'au bâtiment d'usine.

Le bâtiment d'usine abrite une turbine Pelton et un alternateur et le canal de fuite alimente la rivière de Sainte-Engrâce qui est très souvent à sec.

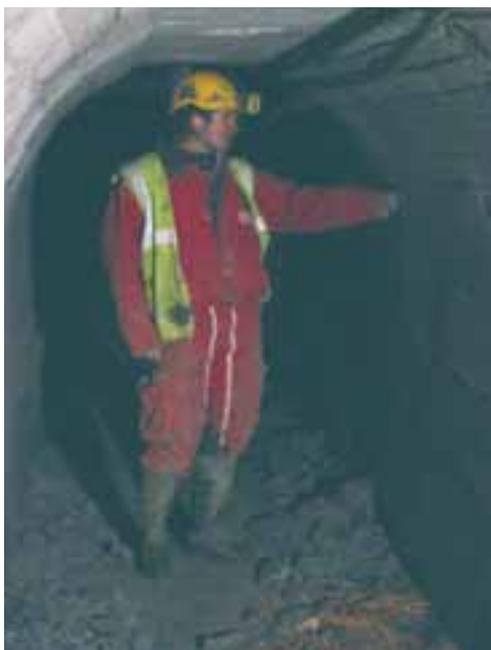
- Puissance brute maximale : 4 473 kW.
- Volume d'eau turbiné : 9 Mm<sup>3</sup>/an.
- Productible : 11 GWh/an.

En 2005, la demande est instruite par l'administration dans les meilleurs délais. L'enquête publique recueille une grande majorité d'avis favorables et le préfet des Pyrénées-Atlantiques accorde l'autorisation à la S.H.E.M. en novembre de la même année.

## DES TRAVAUX PRÉPARATOIRES COMPLEXES

Les travaux préparatoires démarrent en février 2006 :

- ◆ réalisation de 2 km de piste pour l'accès à l'entrée de la galerie par l'entreprise Bergerot d'Arette. La piste est terminée fin avril;
  - ◆ mise en sécurité de la galerie :
    - purge des éléments ou blocs instables,
    - ancrage des dièdres et zones instables pouvant à terme faire craindre un risque,
    - évacuation de tous les déblais encombrant le sol de la galerie,
    - dépose des divers boisages restant,
    - mise en place d'une coque béton projeté RIG de 7 cm ou 14 cm sur 100 m de galerie,
    - réalisation d'injection d'extrados dans la dernière zone revêtue au débouché dans la salle.
- Ces travaux ont été réalisés par l'entreprise HC

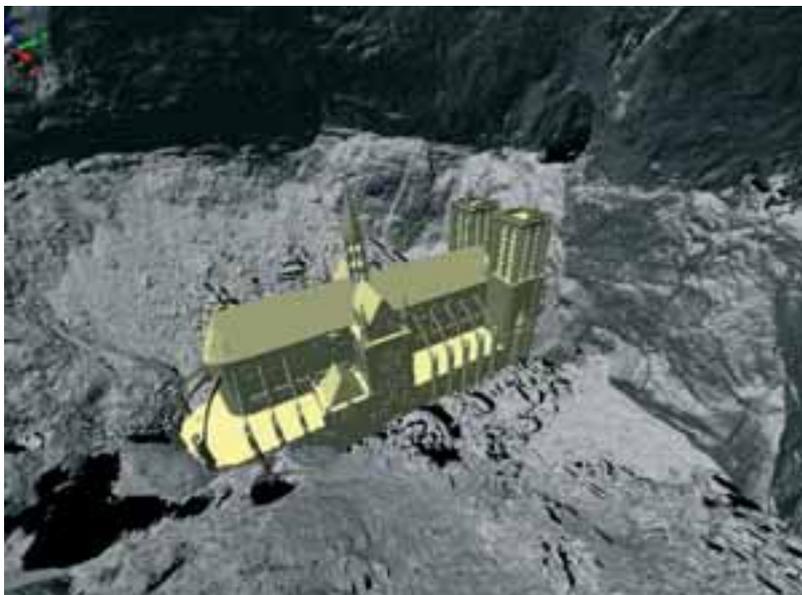


Le radier de la galerie souterraine existante qui accueillera à terme la tuyauterie a une section en fer à cheval de 1,45 m de largeur sur 1,80 m à 2,00 m de hauteur

*The foundation raft of the existing underground gallery which will ultimately receive the piping has a horseshoe-shaped section 1.45 metres wide and 1.80 to 2.00 metres high*

## LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 400 m<sup>3</sup> de déblais marinés en galerie
- 660 ml de tuyauterie fonte DN 600
- 300 m<sup>3</sup> de béton à couler en galerie
- Plus de 6 000 heures de travail



**Intégration virtuelle de la cathédrale Notre-Dame de Paris dans la salle de La Verna réalisée par la société ATM3D**

*Virtual integration of Notre-Dame de Paris cathedral in the La Verna room produced by the company ATM3D*

Pyrénées de Soulom (65) entre mai et juillet 2006. Les premiers tuyaux Ø 600 mm, en fonte Natural de Pont-à-Mousson, ont été posés fin juillet en galerie dans une tranchée de 70 cm de profondeur; ils seront recouverts par 10 cm de béton fibré avec cunette en rive droite et gaines bétonnées en rive gauche.

Ces travaux sont également réalisés par l'entreprise HC Pyrénées.

Diverses opérations vont s'enchaîner pour permettre une mise en service en décembre 2007.

Les premiers calculs de Jacques Labeyrie au fond du puits Lépineux auront mis 55 ans pour se concrétiser.

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### **Maitre d'ouvrage**

Société Hydroélectrique du Midi (S.H.E.M.)

### **Maitre d'œuvre**

Société Hydroélectrique du Midi (S.H.E.M.)

### **Coordination S.P.S.**

Jean-Jacques Pratedessus

### **Entreprise titulaire**

HC Pyrénées

### **Sous-traitant pour le minage**

Pyrénées Minage

## ABSTRACT

**Hydropower project in the Pyrénées-Atlantiques region : La Verna project**

*L. Viguier, B. Bertuola*

The company HC Pyrénées, a member of the HC Group, is currently performing on behalf of the SNCF (French Rail) subsidiary SHEM (Société Hydroélectrique du Midi) part of a hydropower project in the Pyrénées-Atlantiques department, in the Sainte-Engrâce district (Basque Country).

This work involves construction of a cast iron supply pipe 600 mm in diameter, buried in the foundation raft of an existing underground gallery 660 m long, complicated work given the cramped space.

## RESUMEN ESPAÑOL

**Ordenación hidroeléctrica en Pirineos-Atlánticos : proyecto de la Verna**

*L. Viguier y B. Bertuola*

La empresa HC Pyrénées, filial del Grupo HC, está ejecutando actualmente por cuenta de la SHEM (Société Hydroélectrique du Midi) filial de la SNCF, una parte de una ordenación hidroeléctrica en el departamento de los Pirineos-Atlánticos, en el municipio de Sainte-Engrâce (País Vasco).

Estos trabajos consisten en la ejecución de una aducción en tubería de fundición de 600 mm de diámetro, enterada en la solera de una galería subterránea existente, de una longitud de 660 metros, cuya exigüidad ha venido a complicar los trabajos.

# Record aux Sables d'Olonne : sous-marin de 623 m de long,

CSM Bessac vient de réaliser la partie souterraine de l'émissaire de rejet des Sables d'Olonne.

Le collecteur de 623 m de long, en tuyaux en béton armé de 1400 mm de diamètre intérieur, a été réalisé par fonçage au microtunnelier. C'est un chantier difficile par la longueur du fonçage, une pente à 10 %, une courbe en profil, par la géologie constituée de gneiss avec alternance d'argiles et une charge d'eau de 15 m.

Il s'agit là du plus long fonçage jamais réalisé pour un diamètre nominal inférieur à 1400 mm.



Photo 1  
Vue aérienne dans l'axe de l'émissaire  
Aerial view in the axis of the outfall sewer

Dans la zone de l'estran, quand l'accès est possible, les émissaires sont posés avec des moyens terrestres, à la marée.

Dans le cas particulier du site de l'émissaire de rejet des Sables d'Olonne il n'était pas possible de procéder par cette méthode classique.

En effet, la zone de marnage est d'accès difficile par la terre et, au-delà, les hauts fonds rocheux interdisent l'approche des barges. De plus, il a été estimé qu'un ouvrage posé dans cette zone serait difficile à protéger contre la force des marées, des courants et des tempêtes (photo 1).

Pour s'affranchir de ces difficultés, les concepteurs ont décidé de réaliser une partie de l'émissaire en tunnel.

## ■ UN FONÇAGE EN COURBE

L'émissaire de rejet a une longueur totale de 1520 m. La partie réalisée en tunnel a une longueur de 623 m entre le puits de départ à terre et la sortie sous-marine au large. La partie aval est constituée d'un tuyau en PEHD de 900 mm de diamètre posé en souille (figure 1).

CSM Bessac, spécialiste dans la réalisation d'ouvrages souterrains, a retenu la technique du fonçage au microtunnelier, une solution adaptée à la construction de collecteurs de faible diamètre sur des longueurs importantes, dans des conditions géologiques difficiles en rocher ou en terrain meuble et sous charge hydrostatique importante.

Le principe consiste à pousser des éléments de tuyau à partir d'un puits situé sur la partie terrestre, le creusement à l'avant de la conduite poussée étant assuré par le microtunnelier. Une fois parvenu à l'extrémité de l'ouvrage, le tunnelier est récupéré en mer dans une fouille creusée dans le fond.

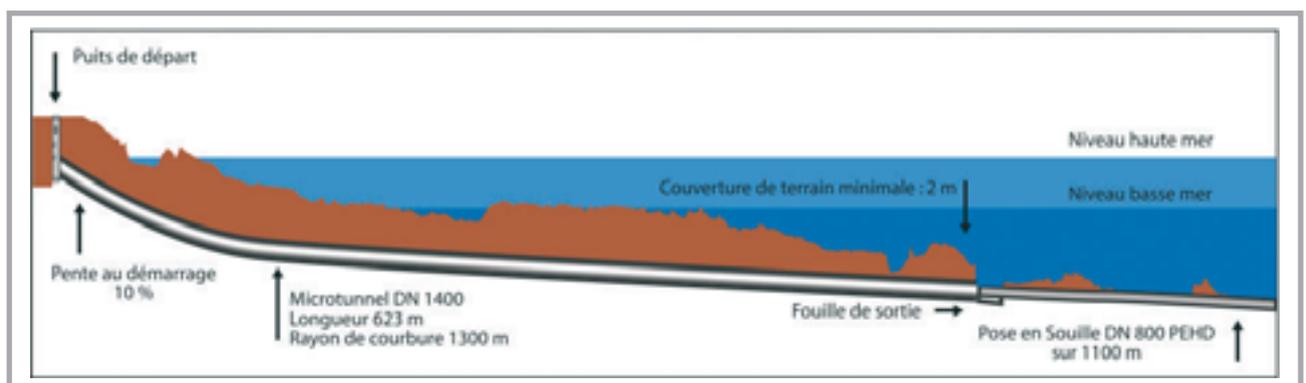
L'émissaire a un diamètre nominal de 1400 mm.

## ■ PROTÉGER L'ENVIRONNEMENT DANS UNE CONFIGURATION DIFFICILE

En zone côtière, les eaux usées dépolluées dans des stations d'épuration sont rejetées au large, au moyen de collecteurs sous-marins. Pour que la dilution et l'évacuation des effluents soit correcte, le point de rejet doit être situé au large, en fonction des courants.

Les émissaires de rejets sont généralement ensouillés ou bien posés et lestés directement sur les fonds marins. Ces travaux sont alors réalisés avec des moyens maritimes et des plongeurs.

Figure 1  
Profil schématique du projet  
Schematic profile of the project



# CSM Bessac réalise un tunnel au microtunnelier

**Jean-Noël Lasfargue**



**DIRECTEUR  
COMMERCIAL  
CSM Bessac  
(groupe Solétanche Bachy)**



**Photo 2**  
Vue intérieure dans la courbure  
*Interior view in the bend*

Il commence en attaque descendante avec une pente de 10 % d'une centaine de mètres au départ qui se prolonge par une courbe d'un rayon de 1300 m (photo 2). La couverture de terrain au-dessus du tunnel varie de 7 m à quelques dizaines de centimètres seulement. Après être passé sous la route côtière, l'ouvrage se trouve rapidement sous le fond marin, sous une pression hydrostatique qui atteint 15 m d'eau à l'extrémité.

## ■ DES ALGUES DANS LES DÉBLAIS DU TUNNEL

Le faciès rocheux annoncé sur le tracé était majoritairement constitué de gneiss dur et très abrasif. Le fonçage a rencontré des parties fracturées créant une communication directe entre l'océan et le front d'attaque du tunnelier : des algues ont été retrouvées dans les déblais à la sortie du dessableur de l'unité traitement, ce qui n'est pas commun ! En outre, il a fallu composer avec de nombreux passages d'argile.

Le puits de départ de 7,90 m de profondeur a été creusé à l'explosif, par volées de 1,50 m ex-



**Photo 3**  
Puits de départ et la station de poussage de 850 t  
*Starting shaft and the 850-tonne jacking station*

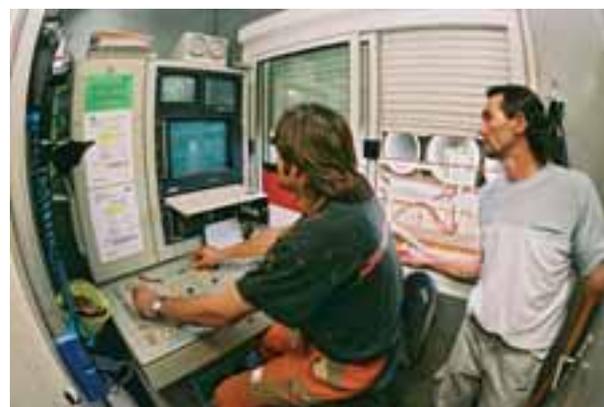
geant 52 trous de prédécoupage, 12 trous pour le bouchon et 66 trous d'abattage. La paroi du puits a été soutenue par béton projeté et boulons scellés au terrain. Le fond du puits a été garni d'un radier en béton armé.

A l'intérieur de ce puits de départ et autour de lui en surface, sont disposées toutes les installations nécessaires au fonctionnement du microtunnelier.

Au fond est installé le bâti de poussée nécessaire au fonçage de la conduite préfabriquée. Il est équipé de deux vérins qui développent une poussée totale de 850 t (photo 3).

C'est en surface qu'on trouve le container de pilotage, centre névralgique à partir duquel les opérateurs font fonctionner le microtunnelier, le contrôlent et le dirigent (photo 4).

Le système de marinage est hydraulique. Il évacue les déblais découpés par la roue du microtunnelier jusqu'à l'unité de traitement installée en surface. En surface, également, sont stockés les tuyaux en



**Photo 4**  
Poste de pilotage en surface  
*Control console on the surface*

**Photo 5**  
Stockage  
des éléments  
de tuyau  
*Storage  
of pipe elements*



► béton armé de 3 m de long (photo 5). Ces tuyaux ont été conçus en fonction des particularités du chantier : tracé en courbe et longueur foncée très importante. Les éléments sont emboîtés de manière étanche par bagues métalliques et joints en élastomère.

## LES PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS POUR LA RÉALISATION DU TUNNEL

- Container de pilotage Herrenknecht AVN TB
- Bâti de poussée de 850 t
- Microtunnelier AVN 1500 TB
  - Roue de coupe pour rocher avec élargisseur Ø 1850 mm
  - Puissance 132 kW
  - Station de poussée embarquée de 500 t
  - Couple 474 kNm
  - Confinement à l'air comprimé
  - Chambre d'abatage visitable par une ouverture Ø 570 mm
  - Longueur des 4 modules : 12 m
  - Poids : 50 t
- 6 stations de poussée intermédiaires
- Centrale automatique de lubrification
- Unité de traitement des déblais de 250 m<sup>3</sup>/heure
- 3 pompes de marinage de 90 kW
- Module de guidage
- 2 groupes électrogènes de 700 kVA
- 2 surpresseurs d'air comprimé de 90 kW

## ■ UN DISPOSITIF DE GUIDAGE PRÉCIS

Le microtunnelier est descendu dans le puits en quatre éléments qui sont introduits successivement dans le terrain (photo 6).

Le premier de ces éléments porte la roue de coupe équipée de molettes et entraînée par des moteurs hydrauliques. Ce premier module intègre les vérins qui permettent l'orientation de la tête de coupe pour le guidage de la trajectoire. Le système de guidage embarqué est essentiellement constitué d'un gyroscope associé à un niveau électronique. Il donne en permanence au pilote la position de la machine en x, y, z.

Il est à noter que c'est la première fois en France que ce matériel de guidage est utilisé dans un microtunnelier. Les tolérances d'exécution, qui imposaient notamment d'arriver au point prévu avec une précision de 30 cm, ont été parfaitement respectées avec une arrivée à 5 cm du point théorique. Les trois autres éléments du microtunnelier contiennent les organes de fonctionnement suivants :

- ◆ le groupe hydraulique qui produit la puissance de la machine ;
- ◆ le sas de compression qui permet le confinement à l'air comprimé de la partie avant de la machine pour les opérations de visite de la chambre d'abatage ;
- ◆ la pompe de retour de marinage pour le transport des déblais ;
- ◆ la station télescopique de poussée à quatre vérins qui permet à la roue de coupe d'exercer sur les molettes la pression nécessaire à l'abatage du rocher.

Les blocs les plus gros détachés du front sont réduits en éléments fins par le cône de concassage placé à l'arrière de la roue.

Sur ce chantier, la forte abrasivité du gneiss et l'alternance entre rocher et argile nécessitera de nombreux accès au front pour inspecter la roue et pour remplacer les outils de coupe. La roue porte 10 molettes dont plusieurs jeux ont été consommés. Les remplacements de molette sont des opérations très délicates, chaque molette pesant 60 kg. En outre, le confinement à l'air comprimé a été souvent nécessaire pour ces interventions au front chaque fois qu'il y avait communication directe du front avec l'océan.

## ■ MARINAGE ET LUBRIFICATION À LA BOUE

L'extraction des déblais est assurée par une circulation de boue. La boue fabriquée en surface est amenée, sous pression, dans la roue de coupe. Elle est mélangée aux déblais de creusement et elle repart en surface où elle est séparée des déblais par une installation de criblage. Cette instal-

lation est composée d'un dessableur primaire et d'une série d'hydro-cyclones. On sépare ainsi tous les éléments de dimension supérieure à 100  $\mu$ . Le circuit de marinage composé du circuit aller, du circuit retour et des pompes a été conçu pour faire face à la très grande abrasivité du terrain. Notamment les conduites de marinage ont été épaissies et on a installé des tuyaux de marinage télescopiques au droit des stations intermédiaires de poussée. Les turbines et les volutes des pompes de marinage ont fait l'objet de remplacements fréquents. Outre sa fonction de marinage, la boue sous pression participe au confinement. Elle évite la décompression des terrains meubles.

## ■ L'ENNEMI, C'EST LE FROTTEMENT

Les tuyaux et le microtunnelier sont poussés dans le terrain par la station principale installée dans le puits de départ. Les frottements du terrain sur les tuyaux augmentent avec la longueur. Avant que ces frottements deviennent excessifs, on met en place une station intermédiaire de poussée entre deux tuyaux (photo 7). Chaque station intermédiaire pousse un tronçon de la conduite. Dans le cas de l'émissaire des Sables d'Olonne, six stations intermédiaires au total ont dû être installées.

Pour diminuer les frottements du terrain sur le tuyau poussé, on injecte, dans l'espace annulaire créé entre l'excavation et l'extrados du tuyau, des produits lubrifiants tels que bentonite ou polymères. L'injection est automatisée. Des stations d'injection commandées électroniquement depuis le container de pilotage sont placées tous les 15 m dans le tuyau. Chaque station alimente trois points d'injection disposés à 120°. Chaque station d'injection est paramétrée individuellement depuis le container de pilotage pour ce qui concerne le volume, la pression et la fréquence. Le protocole d'injection peut être adapté à tout moment pour chaque station en fonction de l'évolution des efforts de poussée constatée sur les stations de poussée intermédiaires.

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS RÉALISÉES

- Puits de départ : 6,50 m x 5,50 m x 7,90 m de profondeur
- Forage de tunnel : 623 m,  $\varnothing$  1 850 mm
- Tuyaux foncés en béton armé : 623 m,  $\varnothing_{\text{int}} = 1 400$  mm,  $\varnothing_{\text{ext}} = 1 790$  mm



**Photo 6**  
Descente du premier élément de tunnelier dans le puits de départ  
*Lowering the first TBM element into the starting shaft*



**Photo 7**  
Une des six stations de poussée intermédiaires  
*One of the six intermediate jacking stations*

## ■ AU BOUT DU TUNNEL... PAR QUINZE MÈTRES DE FOND

Pendant la progression du tunnel, on réalise la fouille de récupération du tunnelier. Celle-ci est creusée depuis une barge auto-élevatrice en position sur le point d'arrivée au large. Comme pour le puits de départ, le rocher est excavé à l'explosif. Après chaque tir la fouille est draguée mécaniquement à la benne preneuse.

Le tunnelier arrive dans la fouille de sortie à une quinzaine de mètres sous le niveau de la mer. Le tunnelier est alors déboîté de la conduite par un dispositif hydraulique commandé depuis la barge. Sa récupération est une opération délicate qui, comme toujours pour les travaux à la mer, est totalement dépendante des conditions météorologiques et de l'état de la mer, notamment de la hauteur de la houle. Il ne s'agit pas moins que de sortir de l'eau une pièce de 12 m de long pesant 50 t.

Les plongeurs arriment un palonnier sur les quatre modules du microtunnelier. Ce palonnier et son système d'arrimage sont conçus pour que les quatre modules restent solidaires. Une puissante grue sur



**Photo 8**  
Retour du tunnelier au port après sa récupération en mer

*Return of the TBM to the port after its recovery at sea*

► ponton lève le tunnelier jusqu'à la surface de l'eau, puis celui-ci est arrimé sur la barge qui l'amènera jusqu'au port (photo 8).

La dernière phase de l'exécution du tunnel consiste à en équiper la tête d'un cône d'adaptation en acier inoxydable. Cette pièce est mise en place par des plongeurs. Elle permet la connexion ultérieure du tuyau posé en souille qui prolonge la section en tunnel.

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### **Maitre d'ouvrage**

Communauté de Communes des Olonnes

#### **Maitre d'œuvre**

Béture Cerec

#### **Entreprise**

Groupement EMCC/CSM Bessac/Acanthe/Parengé

- Travaux maritimes : EMCC, mandataire du groupement
- Tunnel et puits de départ : CSM Bessac
- Travaux annexes : Acanthe et Parengé

### ABSTRACT

**Record at Sables d'Olonne : CSM Bessac builds an undersea tunnel 623 metres long, by microtunnel boring machine**

*J.-N. Lasfargue*

**CSM Bessac recently built the underground part of the Sables d'Olonne out-fall sewer.**

**The main sewer, 623 metres long, in reinforced concrete pipes of inside diameter 1 400 mm, was dug by a micro-tunnel boring machine.**

**This is a difficult project due to the drive length, a 10 % slope, a profile curve, the geology consisting of gneiss with alternating clays and a water head of 15 metres.**

**This is the longest drive ever executed for a nominal diameter of less than 1 400 mm.**

### RESUMEN ESPAÑOL

**Récord en Les Sables d'Olonne : CSM Bessac lleva a cabo la ejecución de un túnel submarino de una longitud de 623 metros, mediante una microtuneladora**

*J.-N. Lasfargue*

**CSM Bessac acaba de ejecutar la parte subterránea del canal de vertido de Les Sables d'Olonne.**

**El colector de 623 m de longitud, en tuberías de hormigón armado de 1 400 mm de diámetro interior, se ha ejecutado mediante excavación con microtuneladora.**

**Se trata de una obra difícil debido a la longitud de la excavación, un pendiente de 10 %, una curva perfilada, y también por la geología formada de gneiss con alternancia de arcillas y una carga de agua de 15 m.**

**Se trata aquí de la excavación más larga jamás ejecutada para un diámetro nominal inferior a 1 400 mm.**

# Excavation du tunnel urbain n° 1 de Porto

## Avantages de l'utilisation de détonateurs électroniques

**Le tunnel urbain n° 1 en cours de réalisation à Porto fait partie des grands travaux d'amélioration des conditions de vie et de circulation engagés par la Ville dans le centre historique. Ce tunnel de 650 m de long est excavé dans le massif granitique de Porto situé à une profondeur comprise entre 4 et 20 m.**

**Le projet, une première fois démarré en 2000, a été suspendu devant l'impossibilité de creusement mécanique. Un second appel d'offres autorisant alors l'utilisation très stricte d'explosifs a été relancé par la Ville de Porto.**

**Les détonateurs électriques qui ne répondaient pas à toutes les contraintes de réalisation de l'ouvrage ont été écartés au profit de détonateurs électroniques.**

**Les travaux d'excavation ont débuté en janvier 2004 avec des tirs de 50 kg de charge explosive. L'utilisation de détonateurs électroniques Daveytronic a permis d'augmenter la vitesse d'excavation tout en permettant un contrôle strict des vibrations et dans des conditions de sécurité accrues. La demi-section supérieure a pu ainsi être excavée en une seule fois ce qui a permis un gain de temps de 2 mois sur l'année.**

### ■ PRÉSENTATION DU PROJET

Durant la décennie 90, l'augmentation significative de la circulation dans le centre-ville de diverses villes portugaises a bouleversé la vie quotidienne des populations et fragilisé la pérennité des immeubles historiques. La Ville de Porto a engagé un ambitieux programme d'aménagements routiers et ferroviaires afin d'assurer une circulation plus fluide en son centre et une meilleure liaison entre le centre-ville et les banlieues.

Ce programme comprend entre autres la construction de tunnels urbains doublant les voies de surface et éliminant les croisements compliqués. Le tunnel n° 1 fait partie de ces aménagements, en traversant au centre-ville une zone très urbanisée comprenant des bâtiments historiques, deux hôpitaux, une caserne ainsi que des immeubles anciens dont certains très endommagés, une place avec parking souterrain et des rues en circulation (photo 1).

Cet ouvrage de 650 m de long dont 400 m d'excavation souterraine en section de 100 m<sup>2</sup> permet le passage de deux voies de circulation (figure 1, page suivante).

Le creusement est réalisé en deux phases, demi-section supérieure (55 m<sup>2</sup>) et stross (45 m<sup>2</sup>).

Le tunnel traverse majoritairement la formation granitique de Porto avec une hétérogénéité majeure située à 50 m de l'entrée ouest constituée d'un granit très altéré et gorgé d'eau. La coupe géolo-



© F. Piqueiro/Foto Engenho

gique (figure 2, page suivante) localise les six types de granits existants allant de 100 % de granit altéré constitué d'un mélange d'argile et de sable – couleur claire vert et jaune – à un granit sain compact – couleur rouge à violet.

La zone de granit très altéré a nécessité d'impor-

### Vitor Dinis



DIRECTEUR TECHNIQUE  
Spie Batignolles Europe  
(Lisbonne, Portugal)

### Lúcia Brandão



GÉOLOGUE  
Spie Batignolles Europe  
(Lisbonne, Portugal)

### Yannick Bleuzen



INGÉNIEUR SERVICE  
TECHNIQUE  
Nitro-Bickford (Paris, France)

### Frédéric Monath

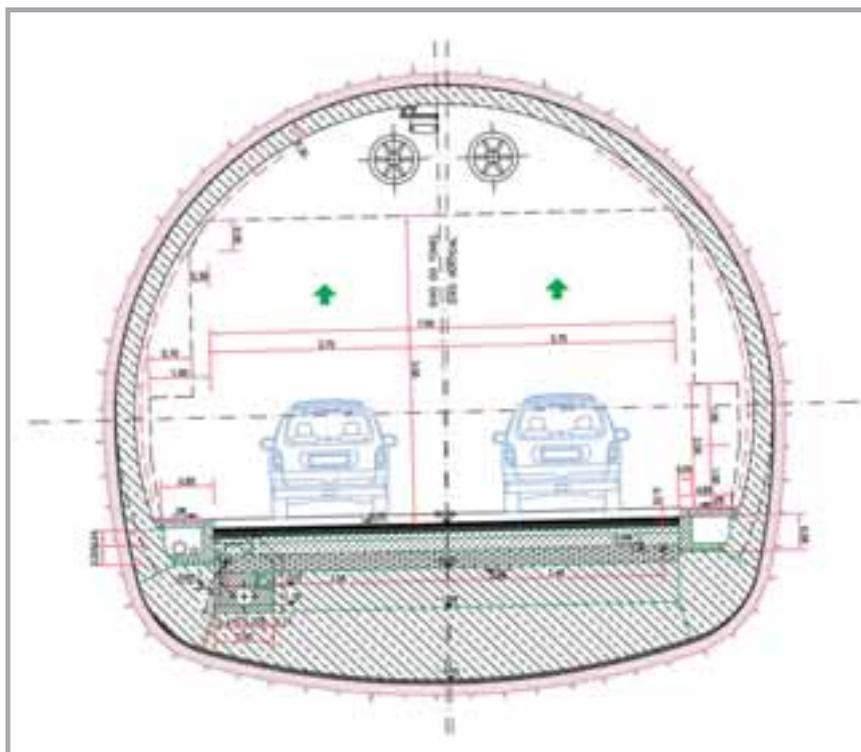


INGÉNIEUR SERVICE  
TECHNIQUE  
Nitro-Bickford (Paris, France)

Photo 1  
Vue aérienne  
des travaux

*Aerial view  
of the works*

▶ tants travaux de confortement et un soutènement provisoire lourd. Cette excavation a été réalisée par des moyens mécaniques uniquement avec des avancements très faibles (0,80 m). Sur le front Est, après 80 m de géologie difficile, les terrains rencontrés ont été conformes aux prévisions et ont permis le creusement à l'explosif. Les hauteurs de recouvrement entre la calotte du tunnel et la surface varient de 4,5 m au front ouest à un maximum de 23 m. La zone correspondant au granit très altéré présente un recouvrement de 10 m environ.



**Figure 1**  
Section transversale  
Cross section

Devant cet environnement contraignant et la complexité géologique – une même section pouvant avoir tous les types de granit –, un suivi très pointu des travaux de revêtement provisoire et du contrôle des nuisances a été effectué : horaires et vibrations des tirs, tassement des terrains et des immeubles, émission de gaz et de poussière.

Il convient également de noter que la valeur contractuelle des vibrations au moment des tirs est limitée par la norme portugaise NP 2072 à 20 mm/s quelle que soit la fréquence.

A l'appel d'offres Spie Batignolles Europe, en collaboration avec Nitro-Bickford, a proposé une solution variante basée sur l'utilisation du détonateur électronique présentant les avantages suivants :

- ◆ l'assurance d'une détonation séparée de chaque trou afin de réduire à son minimum la charge unitaire mise à feu ;
- ◆ la possibilité de modifier facilement les séquences d'amorçage afin d'adapter les plans de tir en fonction des conditions rencontrées (réponse des bâtiments, résultat du tir...);

- ◆ la possibilité de tirer la demi-section supérieure en un seul tir pour augmenter la productivité du chantier et se conformer au délai global d'excavation de 12 mois ;

- ◆ la sécurité d'utilisation par un contrôle total des éléments du tir jusqu'à l'ordre de mise à feu. Cette solution variante a été retenue par les services techniques de la Ville de Porto pour la réalisation du tunnel.

## ■ LE PLAN DE TIR

Le plan de tir a pris en compte l'actuelle norme portugaise de vibration avec ses révisions en cours, l'étude de risque sur les édifices adjacents et la géologie du site.

Avant d'effectuer le tir de la section complète des essais ont été effectués avec un contrôle strict des vibrations de manière à définir les charges maximales à utiliser, leur espacement et la durée du tir.

## ■ LE MODE OPÉRATOIRE

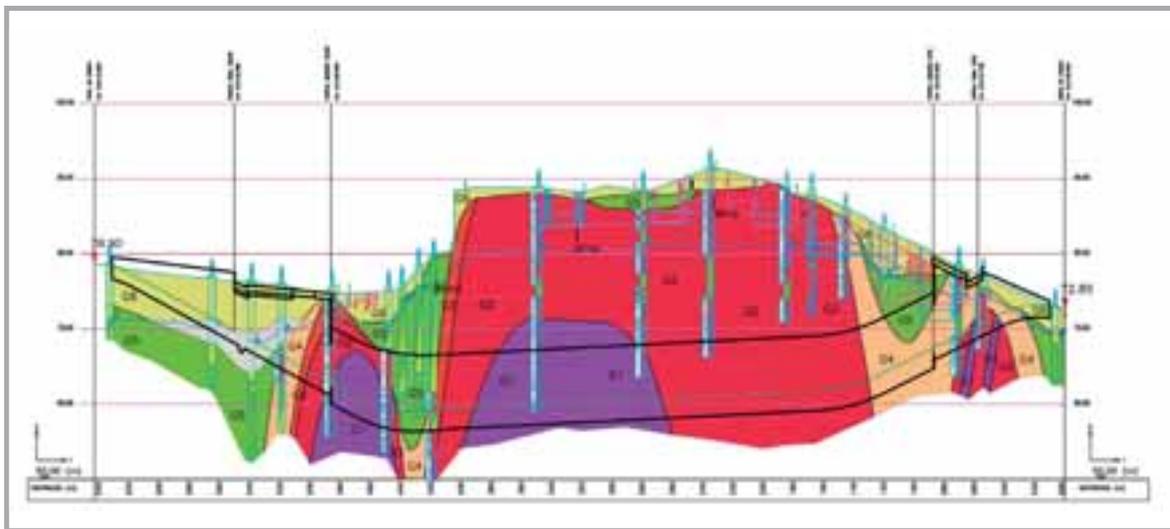
Le mode opératoire simple, c'est un des avantages du système, procède en quatre phases : programmation, connexions, contrôle et procédure de tir. Les produits utilisés pour les tirs sont contrôlés, dans le cadre d'une procédure stricte de mise en œuvre, par une équipe munie de quatre sismographes qui pour chaque tir enregistrent divers paramètres : vitesse d'onde, déplacements et fréquences, et déterminent ainsi les paramètres à adopter pour le prochain tir.

### Programmation

La console de programmation est un petit équipement portable qui permet de contrôler et d'identifier les temps d'explosion de chaque détonateur et de mémoriser la séquence de tir. Il permet également de vérifier et éventuellement de modifier les retards attribués.

L'ordre de programmation peut être indépendant de la séquence de tir, toutefois comme il convient de contrôler la séquence de tir, il est conseillé de travailler de façon méthodique et de suivre le plan de tir en utilisant la numérotation affectée à chaque détonateur.

Ainsi le chef de tir muni du plan de tir et de la console de programmation procédera à la liaison de chaque détonateur à la console, et programmera le temps d'explosion. Pendant cette opération, la console vérifiera immédiatement le temps de mise à feu et la valeur du retard, permettant si nécessaire d'effectuer une reprogrammation dans le cas où celle-ci a déjà été faite ou s'il existe duplication du temps de mise à feu.



**Figure 2**  
**Coupe**  
**géologique**  
**Geological**  
**cross section**

## Connexions

A partir du moment où tous les détonateurs sont programmés et les fils coupés, l'opérateur procède, de la manière suivante, à la réalisation du circuit de tir en utilisant les connecteurs spéciaux :

- ◆ tirage de la ligne de tir le long du tunnel (fils de cuivre de 7/10 mm de couleur orange), avec extrémité ouverte;
- ◆ chaque détonateur est installé dans la cartouche de Nitram 9, détonateur dirigé vers la sortie du trou, et les fils du détonateur fixé à la cartouche par un adhésif. La cartouche est introduite jusqu'au fond du trou en utilisant une canne et en vérifiant la conformité avec le plan de tir. Les trous seront fermés par des bouchons en carton, délicatement, pour ne pas endommager les fils du détonateur;
- ◆ mise en place du connecteur sur la ligne principale et fermeture du connecteur pour assurer la liaison détonateur/ligne de tir;
- ◆ après liaison de tous les détonateurs, un contrôle continu du circuit permet de mettre en évidence immédiatement toutes les anomalies.

## Mise à feu

La mise à feu ne peut se faire que si la console est connectée au système et qu'il a été vérifié. Ainsi, après la liaison de la ligne de tir à la console, celle-ci effectue automatiquement les tests de ligne – absence de détonateurs sur la ligne, duplication des temps de mise à feu ou dépassement de capacité – et la cohérence entre les informations contenues dans la console et les détonateurs connectés.

La mise à feu est effective seulement lorsque tous les tests ont été effectués avec succès.

En conséquence, après la phase de connexions, suit une phase de préparation à la mise à feu qui comporte les étapes suivantes :

- ◆ mise en place si nécessaire des protections pour éviter les projections vers l'extérieur et évacuation du personnel de la zone du front;

- ◆ liaison de la console de tir à la ligne de tir;
- ◆ début du processus de tir avec le transfert des informations de la console de programmation vers la console de tir;
- ◆ réalisation des signaux sonores à la surface et à la verticale du tir 5 minutes avant l'heure du tir. A partir de cet instant commence le processus de mise à feu qui comprend :
- ◆ la vérification de la ligne de tir;
- ◆ le contrôle individuel de chaque détonateur effectué avec les condensateurs; contrôle d'une durée de 2 et 5 minutes en fonction du nombre de détonateurs existant sur le front à mettre à feu;
- ◆ réalisation du second signal sonore annonçant le tir dans un délai d'une minute.

A ce moment est donné l'ordre de charge des détonateurs qui dure environ 40 secondes et qui allume le bouton de mise à feu.

Au dernier signal sonore annonçant le tir, la mise à feu peut être lancée.

Après le tir, il faut attendre environ 10 minutes l'évacuation des fumées pour autoriser le personnel à retourner sur le front.

## ■ TRAITEMENT DES IRRÉGULARITÉS

Bien que le système mis en œuvre soit très sûr, il convient de respecter un processus d'inspection systématique du front après le tir. Dans le cas où serait constatée la présence d'explosifs ou de fils de détonateurs suspects, le processus de traitement des produits non détonés doit être engagé. Les divers cas d'irrégularités ont été inventoriés et des procédures spécifiques élaborées pour chacun d'entre eux.

Une partie de ces procédures, les plus significatives de la sécurité apportée par les détonateurs électroniques, sont décrites ci-après :

- ◆ **détonateurs :**

a - Dans le cas où le fil du détonateur est acces-

**Photo 2**  
**Installation**  
**du sismographe**  
*Installation*  
*of the seismograph*



► sible, celui-ci devra être lié à l'unité de programmation de façon à relire le détonateur :

- si la lecture est possible, lier le détonateur à la ligne de tir et faire évacuer le front pour procéder à un nouveau tir (cas très rare et quasiment toujours associé à un défaut du détonateur),

- si la lecture est impossible ou si le tir ne donne rien, le détonateur ne peut être initié, il ne présente aucun danger. On peut procéder au nettoyage du trou avec une barre en matière non ferreuse qui n'exerce pas de choc sur le produit enfoui. Il faut extraire les cartouches de carton et ensuite l'explosif, séparer le détonateur de l'explosif et les mettre dans des boîtes séparées;

b - Dans le cas où la finition de la section d'excavation se fait au moyen d'engins mécaniques et si la zone suspecte ne peut être complètement traitée on devra procéder à un tir pour extraire les explosifs (cas extrêmement rare). Celui-ci devra être mis en œuvre selon les principes suivants : la distance entre le trou suspect et le trou de reprise doit être au minimum de la moitié de la longueur du trou; ainsi par exemple, pour un trou de reprise de 1 m, la distance entre ce trou et le trou suspect sera au minimum 0,5 m.

En cas de doute sur l'inclinaison du trou suspect, la profondeur du trou de reprise devra être limitée à la distance où se trouve la cartouche. Les risques d'explosion des émulsions en cas de contact avec la foration sont très limités, toutefois il sera totalement interdit de forer dans des trous déjà exécutés.

Après la réalisation de la foration, les trous de reprise sont chargés, le tir est effectué et la zone nettoyée.

◆ **explosifs** : il faut procéder à la récupération de toutes les cartouches, le cordeau détonant (produit utilisé pour les trous de découpage) et les mettre dans les caisses en carton pour le retour au fournisseur. Dans le cas où le détonateur se trouverait

dans la cartouche, il convient de séparer les deux, avant de les mettre dans des boîtes différentes. Pendant toute la phase d'excavation du tunnel de Porto (2 x 200 m) où furent utilisés les explosifs et les détonateurs électroniques, soit près de 37 000 unités, seuls quelques cas de détonateurs non explosés sont à signaler, tous inoffensifs, c'est-à-dire que les condensateurs se trouvaient déjà déchargés; une simple séparation des éléments explosifs fut nécessaire.

## ■ CONTRÔLE DES PERTURBATIONS

L'utilisation de l'explosif dans les travaux souterrains conduit à différents types de perturbations, entre elles :

- ◆ les vibrations de l'air ou bruit;
- ◆ les vibrations transmises à travers le sol;
- ◆ les gaz nocifs;
- ◆ les projections;
- ◆ la poussière.

### Les vibrations

Dans toute explosion, une partie de l'énergie est transmise au massif environnant, se propageant sous forme d'ondes vibratoires semblables à celles d'un tremblement de terre, de vitesse différente en fonction du type d'ondes et des propriétés élastiques du sol. Une autre partie est émise sous forme d'ondes aériennes, lesquelles peuvent produire des effets sensibles sur les parties délicates des structures comme par exemple les vitres, les fenêtres. Le reste de l'énergie est dissipé dans la rupture de la roche.

Le bruit ou l'onde de surpression produite par l'explosion dans une galerie est simplement la vibration acoustique transmise par l'air qui provient de l'expansion du gaz produit par les charges explosives à travers les fissures du massif rocheux. Ce phénomène acoustique ressenti par les habitants se manifeste comme une onde de surpression aérienne caractérisée par un pic très bref suivi d'une série d'oscillations.

Proche de la source, cette onde de surpression est constituée d'une large bande de fréquences audibles lesquelles produisent des effets sonores ou bruits. La majeure partie de l'énergie correspond à des fréquences inférieures à 100 Hz avec des pics de surpression compris dans la gamme de 4 Hz à 40 Hz approximativement. La réglementation française recommande que l'onde sonore reste inférieure à 125 dB (L).

Le niveau sonore de l'explosion est d'autant plus important que les charges sont peu confinées; pour preuve l'exemple de l'utilisation d'explosifs dans un massif très fracturé dans lequel la masse de destruction est inférieure à ce qu'elle devrait être.

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Excavation : 40 000 m<sup>3</sup>
- Béton projeté : 3 900 m<sup>3</sup>
- Béton structure : 9 500 m<sup>3</sup>
- Aciers : 500 t
- Délai : 20 mois
- Méthode d'exécution : NATM et Cut and Cover

De fait, les valeurs rencontrées durant quelques tirs ont présenté des valeurs de pic de l'ordre de 100 dB à 132 dB, ce qui est strictement lié au massif granitique peu altéré et moyennement fracturé. En conséquence, on a constaté quelques bris de vitre dans les immeubles adjacents d'une des entrées du tunnel.

Dans le domaine des vibrations proprement dites, il est possible de mesurer les déplacements, les vitesses, les accélérations, les fréquences avec un équipement simple de contrôle : le sismographe numérique avec capteurs intégrés permettant d'enregistrer jusqu'à 350 tirs. Dans le cas du tunnel de Porto il était du type "Miniseis" et "Miniseis 2" (photo 2).

La vibration étant influencée par la vitesse de déplacement d'une particule de sol et le déplacement et la vitesse étant proportionnels à la charge d'explosifs, ceux-ci peuvent être facilement mesurés avec des sismographes. L'évaluation et l'interprétation de la vibration déterminent ainsi avec précision la charge d'explosif à utiliser de façon à garantir l'absence de dommages sur les constructions.

La figure 3 montre un exemple de résultats d'un des sismographes de contrôle de l'explosion alors que l'excavation se trouvait à 2,5 m environ des fondations de l'Institut médico-légal.

Comme le système de détonateur électronique permet une programmation in situ des détonateurs de 1 à 4000 ms, il n'existe pas de répétition de temps; ainsi chaque pic de vitesse correspond à un temps spécifique de détonation.

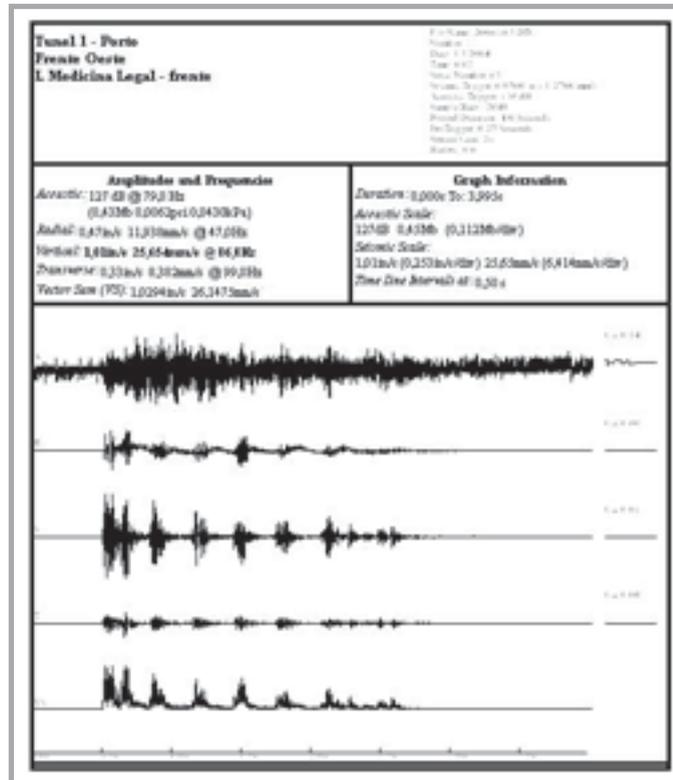
On peut donc vérifier que :

- ◆ le pic de 25,6 mm/s correspond à un retard de temps de 40 ms, c'est-à-dire au trou n° 11 du plan de tir présenté plus haut;
- ◆ le pic de 25,3 mm/s correspond à un retard de temps de 80 ms, c'est-à-dire au trou n° 21;
- ◆ le pic de 25 mm/s correspond à un retard de temps de 170 ms, c'est-à-dire au trou n° 46.

En plus des valeurs de pics maxima, ont été également analysées les fréquences de chacun de ces pics et la traduction respective en déplacement, qui dans le cas du pic de 25,6 mm/s correspond à une fréquence de 86 Hz et à un déplacement de 0,08 mm.

Les retards en question correspondent à la zone du bouchon : les trous 11 et 21 consécutifs et le trou 46 en périphérique. Ainsi, en réduisant les charges des trous 11 et 21 et en maintenant la charge du trou 46 (le pic enregistré pour ce dernier correspond à un phénomène géologique local confirmé par la suite), les valeurs limites de vibration ont été respectées.

L'interprétation des données de chaque tir devra, autant que possible, être faite en fonction des caractéristiques du massif miné de façon à relier chaque pic excessif avec les conditions géologiques existantes qui pourront être ponctuelles et ne pas



**Figure 3**  
**Enregistrement**  
**du sismographe**  
**Seismograph**  
**recording**

se manifester lors des tirs suivants - toutes ces opérations ayant pour objectif de garantir la norme NP 2074.

### Gaz nocifs

La détonation d'une charge explosive produit quelques centaines de litres de gaz secs comme le CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub> et également de la vapeur d'eau.

De ces gaz, les plus toxiques – monoxyde de carbone (CO) et oxyde d'azote (NO et NO<sub>2</sub>) – produisent des perturbations graves qui peuvent entraîner la mort avec des concentrations relativement faibles, de l'ordre de quelques dizaines de ppm.

C'est pourquoi, des équipements de détection de gaz ont été utilisés, de manière à confirmer le temps nécessaire pour le système de ventilation d'évacuer ces gaz du tunnel. Ce temps peut varier de 5 à 10 minutes en fonction de la puissance des ventilateurs, de la longueur du tunnel et de la section de minage.

### Projections et poussière

Les divers tirs ont produit des blocs de taille différente dont la distance de projection dépend de l'état de fracturation du massif, de sa résistance, et (ou) de sa nature, de la charge d'explosif et de la longueur de la volée. Sur ce chantier, des projections comprises entre 20 m et 150 m ont été observées. Quant aux poussières, elles sont inévitables et leur intensité dépend du type des matériaux minés et de l'hydrologie de la zone. De petits nuages de mica ont été visibles immédiatement après le minage dans le granit, et se sont déplacés sur de faibles distances du fait des conditions humides du massif environnant. Cela a été confirmé par des mesures réalisées à l'extérieur du chantier dans des

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### **Maître d'ouvrage**

GOP - Gestão de Obras Públicas da Câmara Municipal do Porto, EM

#### **Contrôle d'exécution**

Geodata

#### **Entreprise**

Spie Batignolles Europe, Ramalho Rosa Cobetar

édifices adjacents et sensibles comme l'hôpital Saint-Antoine.

### ■ CONCLUSION

L'utilisation de détonateurs électroniques accompagnée d'un contrôle continu des nuisances engendrées par les tirs lors de l'excavation du tunnel de Porto a permis :

- ◆ de corriger des situations locales imprévisibles associées à l'hétérogénéité du massif granitique : en permettant la permutation des charges unitaires en fonction du taux de fracturation et/ou d'altération du massif et en les adaptant aux résultats enregistrés sur les structures de surface, le système conduit à une minimisation des effets ;

- ◆ de diminuer la consommation d'explosifs liée à une réduction des temps de réalisation qui a conduit à une augmentation de l'avancement de 100 % par rapport à un processus traditionnel et au minage de la demi-section supérieure en une seule phase, tout en respectant les lois et les règlements nationaux en vigueur ;

- ◆ d'enregistrer pendant toute l'excavation les niveaux de vibrations, de bruit et de pollutions ambiantes minimales, paramètres fondamentaux pour la bonne exécution d'un chantier urbain du début du XXI<sup>e</sup> siècle, où dominant la qualité et le bien-être.

Ainsi, les informations tirées des enregistrements réalisés lors de chaque tir ont été analysées en fonction des données géologiques et géotechniques du massif, pour vérifier ou corriger les lois de propagation des ondes dans le massif rocheux obtenues lors des essais. Ces analyses ont permis d'effectuer les corrections nécessaires afin que les enregistrements suivants restent dans le cadre de la norme portugaise NP 2074, à savoir des valeurs limites de 10 mm/s pour les édifices historiques, dégradés ou en ruine et de 20 mm/s pour les immeubles en béton armé.

### ■ BIBLIOGRAPHIE

[1] Santos da Cunha (2004) – *Túnel de Ceuta – Porto, Procedimento de Tiros Falhados*.

[2] Nitro-Bickford (2003) – *Túnel de Ceuta – Porto, Apresentação e Plano de Tiro*.

[3] Fernando Daniel (2000). *Manual de Utilização de Explosivos em Explorações a Céu Aberto*. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro.

[4] Instituto Geológico e Mineiro (1999). *Regras de Boa Prática no Desmonte a Céu Aberto*.

### ABSTRACT

#### Excavation of urban tunnel No. 1 in Porto. Advantages of using electronic detonators

V. Dinis, L. Brandão, Y. Bleuzen, Fr. Monath

Urban tunnel No. 1 undergoing construction in Oporto is one of the major works projects undertaken by the City in the historic centre to improve living and traffic conditions.

This tunnel, 650 metres long, is excavated from the granitic rock mass of Oporto located at depths ranging between 4 and 20 m.

The project, first begun in 2000, was suspended due to the impossibility of mechanical excavation. A second invitation to tender then authorising the very strictly controlled use of explosives was issued by the City of Oporto. Electric detonators, which did not comply with all the constraints for execution of the structure, were ruled out, being replaced by electronic detonators.

The excavation work began in January 2004 with blasts of 50 kg of explosive charge. By using Daveytronic electronic detonators it was possible to increase the rate of excavation while allowing strict control of vibration in enhanced safety conditions. The upper half section was accordingly able to be excavated in a single operation, permitting a time saving of two months in the year.

### RESUMEN ESPAÑOL

#### Excavación del túnel urbano N° 1 de Porto. Ventajas del empleo de detonadores electrónicos

V. Dinis, L. Brandão, Y. Bleuzen y Fr. Monath

El túnel urbano N° 1 actualmente en curso de ejecución en Porto forma parte de las grandes obras de mejora de las condiciones de vida y de tráfico vislumbradas por la Villa en el casco histórico.

Este túnel de una longitud de 650 metros se ha excavado en el macizo granítico de Porto ubicado a una profundidad que oscila entre 4 y 20 m.

El proyecto, que fue iniciado una primera vez en 2000, fue suspendido ante

la imposibilidad de una perforación mecánica. La Villa de Porto lanzó entonces una segunda licitación que permitía la utilización sumamente controlada de explosivos.

Los detonadores eléctricos que no cumplían con todos los imperativos de realización de la obra no fueron seleccionados y se optaron por detonadores electrónicos.

Los trabajos de excavación dieron comienzo en enero de 2004 mediante voladura de 50 kg de carga explosiva. El empleo de detonadores electrónicos Daveytronic permitió aumentar la velocidad de excavación permitiendo siempre un estricto control de las vibraciones y según condiciones de seguridad incrementadas. La semisección superior se ha podido así excavar de una sola vez, lo que ha permitido una ganancia de tiempo de dos meses en lo que va de año.