

La revue technique des entreprises de Travaux Publics

# Travaux

n°847  
Décembre 2007



## TRAVAUX SOUTERRAINS

- La congélation appliquée aux tunnels construits au tunnelier
- Monaco Urbanisation des terrains SNCF
- Monaco Le tunnel T33
- Le tunnel de Chavanne
- Le tunnel des Grands Goulets
- LGV Lyon-Turin : la descenderie de La Praz
- Rénovation des tunnels de Saint-Germain et Châtillon
- Instrumentation et surveillance des voies ferrées
- Chantiers de canalisations : les chartes de qualité

# Travaux souterrains



# Travaux souterrains : les défis d'une Profession



Didier Lacroix  
Directeur Recherche  
du CETU (Centre d'études  
des Tunnels)

Ce numéro de *Travaux* illustre la vitalité des travaux souterrains en France et le dynamisme de tous les acteurs qui y concourent. Il dénote un fort besoin d'investir la troisième dimension que constitue le sous-sol. Pour ne considérer que les tunnels routiers et ferroviaires, des prévisions mentionnent plus de 2000 km à construire en Europe dans les dix à quinze prochaines années, et ce chiffre serait presque triplé au niveau mondial. Même si la France n'est pas parmi les pays qui construisent le plus d'ouvrages souterrains, les investissements devraient être conséquents, notamment pour les tunnels destinés au rail et les travaux de réhabilitation. Les travaux du Grenelle de l'Environnement en ont donné confirmation.

Dans un domaine aussi complexe que les projets souterrains, un tel développement est le résultat de nombreux défis qui ont été relevés, mais il en pose aussi d'autres pour le futur. Ceux-ci concernent à la fois les limites techniques des solutions souterraines, les attentes des maîtres d'ouvrage sur la gestion des projets et l'acceptabilité par le grand public.

Les avancées considérables des méthodes de construction ont permis de repousser les frontières du réalisable en matière de creusement, et d'améliorer rapidité et sécurité des chantiers. Le champ du possible s'est élargi, mais de nouveaux challenges vont devoir encore être surmontés, par exemple pour les tunnels longs à grande profondeur ou le creusement au tunnelier dans de mauvais terrains immédiatement en dessous du bâti. Les opérations d'amélioration et de mise en sécurité des tunnels en service ont d'autres exigences et impliquent des diagnostics pointus ainsi que le choix d'outils d'analyse et de solutions souvent innovants, pour limiter les perturbations à l'exploitation pendant les travaux.

Le progrès technique ne suffit pas pour répondre aux deux principales inquiétudes que les solutions souterraines soulèvent aujourd'hui encore auprès des maîtres d'ouvrage :

- non seulement le coût reste généralement élevé, tant à l'investissement qu'en exploitation, mais il est difficile à prévoir, et à maîtriser en cours d'opération. En complément des avancées techniques, les

améliorations passent aussi par une appropriation plus grande des méthodes d'identification et de gestion des risques, et cela à toutes les étapes du projet ;

- les délais relèvent d'une problématique analogue : les gains apportés sur les chantiers sont essentiels, mais la durée totale d'une opération est aussi conditionnée par les temps nécessaires pour les décisions politiques et le financement.

L'acceptation sociale des tunnels pose d'autres défis vis-à-vis de leur environnement et de leur usage par l'homme. Certes, ces ouvrages ont généralement un bilan environnemental plus favorable que les mêmes infrastructures en surface, mais à la condition de traiter convenablement l'ensemble des impacts de la construction, et en premier lieu le devenir des déblais. En exploitation, les tunnels routiers concentrent les émissions automobiles aux rejets de ventilation : il est très généralement possible de limiter les effets locaux sans utiliser les nouvelles technologies en développement qui visent à éliminer les polluants, mais dont l'intérêt doit être pesé en tenant compte de tous les aspects, notamment énergétiques.

Ce sont les questions liées à la sécurité en exploitation, pour ne pas parler de la sûreté, qui constituent aujourd'hui la préoccupation première. À la suite des dramatiques incendies survenus depuis une dizaine d'années, de nouvelles réglementations nationales et européennes ont vu le jour tant pour les tunnels routiers que ferroviaires. Ce n'est plus l'infrastructure seule qui doit assurer la sécurité : le système comportant aussi l'exploitation, les secours, les véhicules et les usagers doit être considéré dans son ensemble pour définir des solutions efficaces et raisonnablement économes. Celles-ci doivent intégrer le comportement humain des usagers, mais aussi celui des exploitants et des secours.

Les progrès présents et futurs sur tous ces axes devraient améliorer l'image des ouvrages souterrains auprès des maîtres d'ouvrage comme du grand public. Ils doivent conduire à des solutions adaptées aux attentes des uns et des autres, qui apportent des réponses aux problèmes posés par le manque de place en centre-ville et par les topographies contraignantes que rencontrent les projets interurbains.

## La congélation appliquée Développements récents

**Construire à 100 m de profondeur dans des sols perméables et sous forte charge d'eau est un challenge qui n'est pas encore maîtrisé. Bien que les tunneliers aient progressé, il reste à résoudre le problème des puits d'accès/sortie, des connexions, de la maintenance machine et des interventions dues aux risques géologiques.**

**La congélation est une technique éprouvée, fiable et contrôlée qui permet de construire dans ces conditions difficiles et se présente comme complémentaire aux tunneliers les plus sophistiqués. Bouygues Travaux Publics au travers d'expériences passées, de compétences internes multidisciplinaires et de son investissement en R&D entrevoit des possibilités pertinentes et économiques.**

**Cet article propose de parcourir les projets récents et leurs enseignements et d'aborder les perspectives futures de développement interne des techniques de façon à atteindre des conditions de travaux sûres.**

La demande de construction de tunnels profonds et de grandes longueurs, sous des conditions de sols difficiles et des charges d'eau importantes devient une réalité à laquelle la technique des tunneliers à confinement doit s'adapter. On peut noter que les projets se développent avec de nouvelles contraintes fortes telles que des accès en surface très réduits et des conditions environnementales extrêmement sévères. Deux difficultés majeures perturbent cette évolution :

- les connexions aux tunnels forés qui ne peuvent être construites sous confinement;

- la maintenance des éléments du bouclier au contact du terrain aux fortes profondeurs.

La congélation peut apporter des réponses à ces questions et permet d'entrevoir un développement plus important de ces tunnels extrêmes. Plots de départ et d'arrivée, intertubes, maintenance de la machine et réparation d'un accident majeur peuvent être traités par la congélation dans des conditions économiques raisonnables et des conditions d'hygiène et sécurité acceptables pour les travailleurs.

Cet article propose de faire un point suite à l'expérience de Bouygues TP sur les travaux de congélation. Sur les sept derniers projets étudiés à la Direction technique, tous ont fait l'objet de proposition de congélation avec des applications variées et des conditions toujours uniques. Le champ d'application est illimité, néanmoins, la réussite de ces travaux dépend des essais, des études, du contrôle en construction et du suivi de la mise en froid.

### ■ Projets récents

Tous les projets présentés ci-après ont fait l'objet d'études spécifiques de construction sous congélation. Alors que cette technique réputée difficile et capricieuse était restée réservée à une élite et à des travaux extrêmes, il apparaît que l'évolution des capacités mémoires des ordinateurs et l'utilisation de logiciels couplés permettent de simuler de façon précise le comportement du sol gelé.

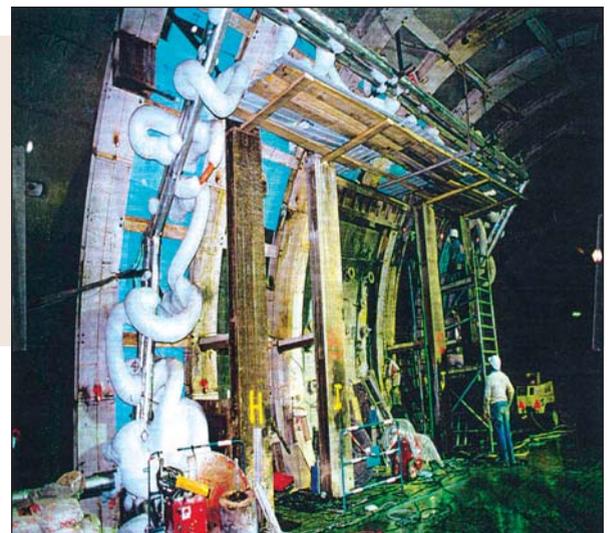
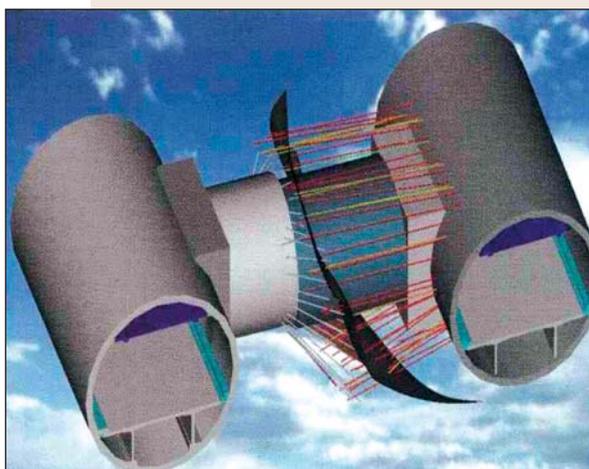
Dans ces conditions, l'intérêt de la congélation répond à :

- un souci de traiter des travaux difficiles (BPNL, France);
- une recherche de protection de l'écologie (Lok Ma Chau, Hong Kong);

Figure 1 et photo 1

Schéma des forages de congélation et vue de l'installation

Diagram of ground freezing boreholes and view of the installation



# aux tunnels construits au tunnelier et perspectives

**Olivier Martin**  
Directeur adjoint  
au bureau d'études  
Bouygues Travaux  
Publics

**Pierre Longchamp**  
Directeur technique  
travaux souterrains  
Bouygues Travaux  
Publics

**Dominique Michel**  
Directeur du pôle  
fondations  
Bouygues Travaux  
Publics

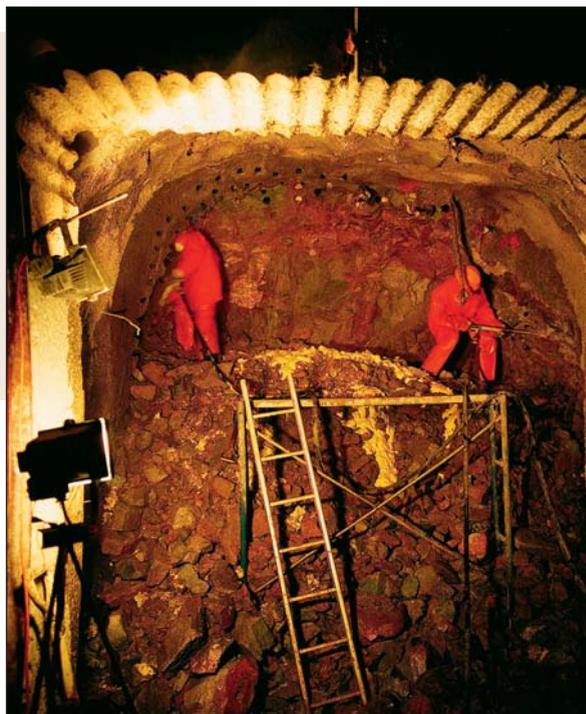
**Francis Vallon**  
Chef de service  
au bureau de méthodes  
et prix  
Bouygues Travaux  
Publics



Photos 2 et 3

Préparation de la congélation et terrassement de l'intertube

Preparation of ground freezing and earthworks for the intertube



## Tunnels ferroviaires de Lok Ma Chau Hong Kong – Construction 2005

Le projet de Lok Ma Chau à Hong Kong est un double tunnel ferroviaire de 8,4 m de diamètre et 3 500 m de longueur relié tous les 240 m par des intertubes piétons. Il traverse une zone écologique protégée de 1 000 m de longueur.

Ce projet est né de la volonté du ministère de l'Environnement de construire des infrastructures de transport qui soient entièrement transparentes au regard de l'écologie naturelle, aussi bien en phase travaux qu'en phase d'exploitation. C'est une contrainte qui a imposé aux travaux souterrains des conditions draconiennes inhabituelles :

- pas d'installation en surface;
- pas de puits d'accès intermédiaires;
- pas de traitement de sols depuis la surface;
- pas de modification de la nappe phréatique;
- pas de sondages;
- pas d'instrumentation profonde.

Ces exigences ont requis des travaux de congélation pour les trois intertubes piétons entre les tunnels ferroviaires. Ces derniers ont été décrits dans le n° 822 de *Travaux* en septembre 2005 (photos 2 et 3).

Il n'y a eu aucun impact sur l'écologie, l'agriculture et la vie naturelle de la surface et du sous-sol. Le niveau de la nappe n'a pas subi de variation anormale et la décongélation du terrain s'est faite de façon lente et contrôlée.

Les mesures de température sur le chantier ont été

## Tunnels routiers du BPNL à Lyon – France – Construction 1995

Les tunnels routiers du BPNL font partie de l'auto-route périphérique autour de la ville de Lyon. Il s'agit de deux tunnels parallèles de 11 m de diamètre comportant chacun deux voies de circulation. Un des intertubes véhicules est situé à l'interface sol/rocher sous deux bars de pression d'eau dans une configuration dangereuse pour la construction. La solution de congélation s'est imposée d'elle-même par manque de solution alternative. Elle a été faite à la saumure sur une géométrie rectangulaire de 8 m de hauteur par 10 m de largeur afin de dégager un gabarit routier.

L'excavation s'est faite dans les conditions de sécurité requises. La congélation et la maintenance ont duré 3 mois et demi (figure 1 et photo 1).

## La congélation appliquée aux tunnels construits au tunnelier. Développements récents et perspectives

Figures 2 et 3

Températures aux points de mesure comparées au modèle de calculs  
 Temperatures at the measuring stations compared with the calculation model

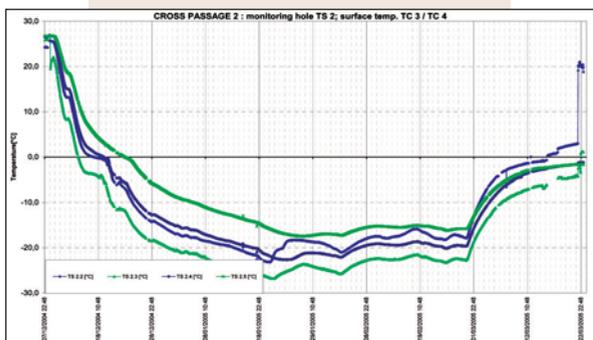
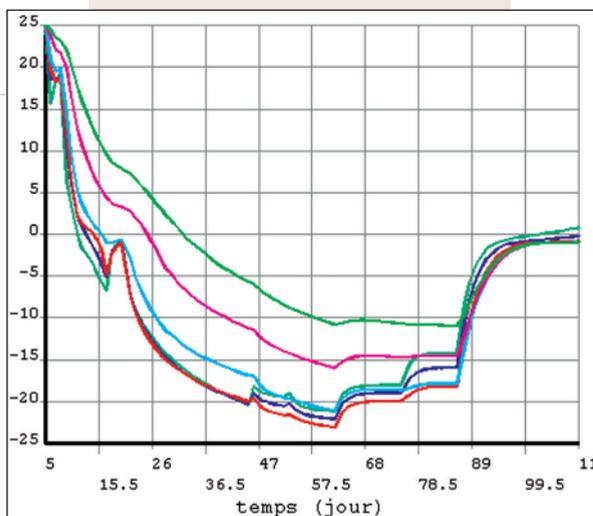


Figure 4  
 Puits et break-ins en congélation  
 Shafts and break-ins undergoing ground freezing



comparées aux mesures sur le modèle numérique après mise en cohérence des températures observées du fluide de congélation. La corrélation est très intéressante et montre que le phénomène thermique est bien transcrit numériquement et que les jauges sont suffisamment précises (figures 2 et 3).

### Émissaire de Portland – USA – Études 2005

Le projet de Portland CSO est un émissaire profond de 6 m de diamètre et de 9 km de long dans la ville de



Photos 4 et 5

Chong Ming.  
 Tête de coupe du tunnelier et tunnel en cours de construction  
 Chong Ming.  
 TBM cutting head and tunnel undergoing construction

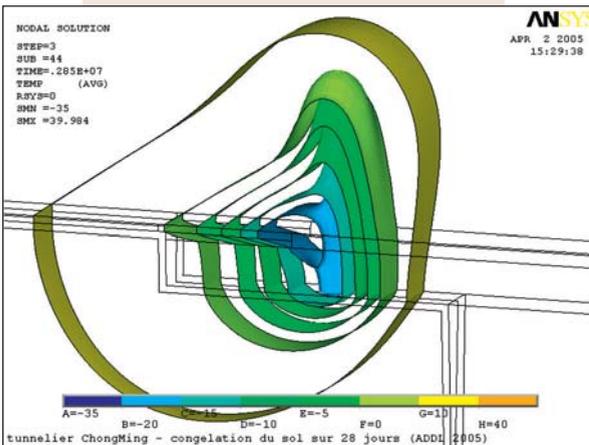
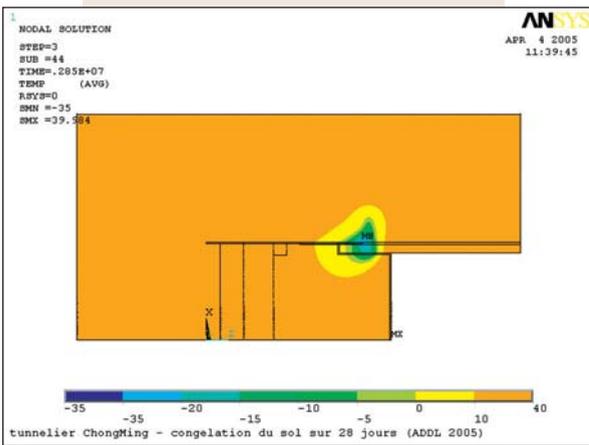


Portland sur la côte ouest-américaine. Il est situé entre 25 et 45 m sous la surface dans des horizons de sables grossiers très perméables (figure 4).

Le projet comprend un tunnel de 6,7 m de diamètre et huit puits qui servent de puits d'entrée, puits de sortie ou puits d'entrée/sortie pour les machines. La solution de congélation est pertinente puisqu'elle permet à la fois d'établir l'étanchéité nécessaire aux extrémités de projet et qu'elle s'effectue à partir de puits verticaux de diamètre 10 à 17 m suffisants pour réaliser les forages de congélation.

### Tunnels routiers Chong Ming – Chine Construction 2006-2008

Les tunnels de Chong Ming à Shanghai permettent de traverser la rivière Yang-Tsé par une autoroute à 2 x 3 voies. Ils ont une longueur de 8,1 km pour un diamètre de 15,45 m. C'est le plus grand tunnel au monde jamais construit à l'aide d'un bouclier (photos 4 et 5).



Figures 5 et 6

Schéma de la congélation vis-à-vis du tunnelier et détails autour du forage

*Diagram of ground freezing in relation to the TBM and details around the borehole*

La rivière Yang-Tsé est difficilement franchissable, c'est l'accès principal au port de Shanghai et elle draine et dépose toutes les alluvions qu'elle a charriées le long de son cours. Les sols sont de faible compacité et demandent des techniques de construction adaptées : tunnelier à pression de boue et congélation sont les deux techniques privilégiées. La congélation étant prévue pour la construction des intertubes et des massifs d'arrêt et de maintenance du tunnelier. En effet, sur la longueur du tunnel il est indispensable d'avoir un ou deux arrêts pour effectuer le contrôle et la maintenance des outils de coupe et des brosses du joint de queue du bouclier.

La congélation des intertubes est classique et le diamètre des tunnels principaux est favorable au positionnement des machines pour le forage des tubes de congélation.

En l'absence de puits intermédiaire, une solution originale par congélation a été imaginée pour la maintenance des brosses, à savoir une opération de congélation

	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Construction KSL	4	3	1	1
Impact sur MTRC	4	4	1	2
Interaction réseaux	1	2	2	1
Durée de construction	3	2	2	2
<b>TOTAL</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>6</b>

Tableau I

Comparaison entre les différentes solutions de traversée

*Comparison between the various crossing solutions*

réalisée par des forages radiaux au travers des voussoirs de tunnel. Elle permet de créer un anneau de sol congelé qui réalise l'étanchéité entre la jupe et les voussoirs et autorise le démontage des brosses d'injection (procédé breveté par Bouygues TP) (figures 5 et 6).

### Tunnels ferroviaires Kowloon Southern Link – Hong Kong – Études 2005

Les tunnels ferroviaires du lot KSL201 (diamètre 8,40 m) passent au-dessus de la ligne de métro MTRC (diamètre 5,30 m) juste avant d'accéder à la station Tsim Sha Tsui. La distance entre l'extrados des deux tunnels est de 2,5 m et a fait craindre une perturbation des tunnels du MTRC par les travaux nouveaux. Cette ligne étant la desserte majeure entre l'île de Hong Kong et la péninsule de Kowloon, elle est traversée par des trains toutes les 2 minutes. Il était donc hors de question de choisir une solution qui pouvait faire porter un risque d'interruption ou d'accident.

L'étude a comparé quatre solutions de traversée (cf. tableau I) :

- option 1 : excavation à ciel ouvert (proposée par le consultant) ;
- option 2 : *pipe jacking* et injection complémentaire ;
- option 3 : congélation des sols ;
- option 4 : traversée au tunnelier.

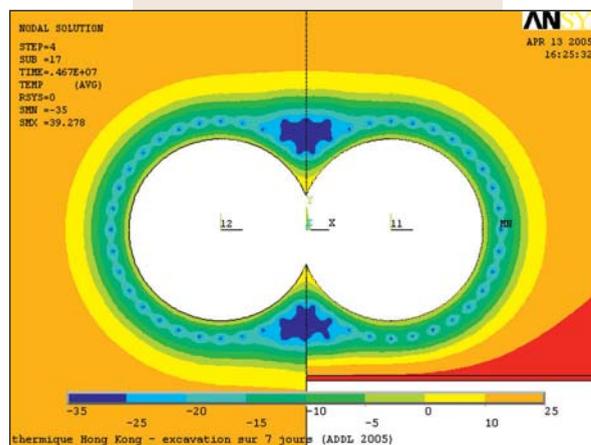
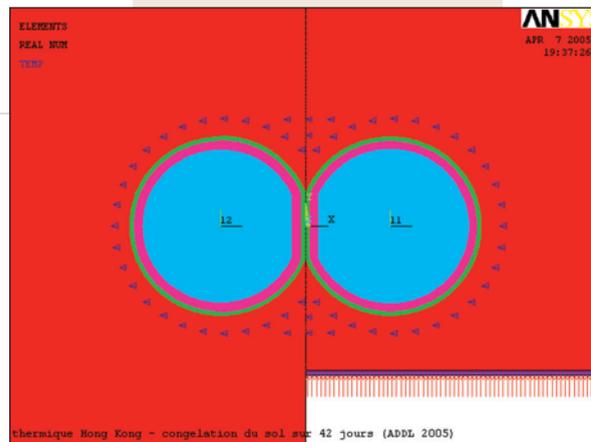
Deux solutions se sont détachées : la congélation et la traversée au tunnelier. Les deux autres ont été exclues car elles s'avéraient trop dangereuses vis-à-vis des travaux et de l'impact sur le tunnel existant.

L'avantage de la congélation bénéficie d'une part aux travaux de préparation très peu perturbants pour le tunnel existant, et au développement de la congélation d'autre part qui englobe le terrain entre les deux tunnels sans pénétrer dans le tunnel existant.

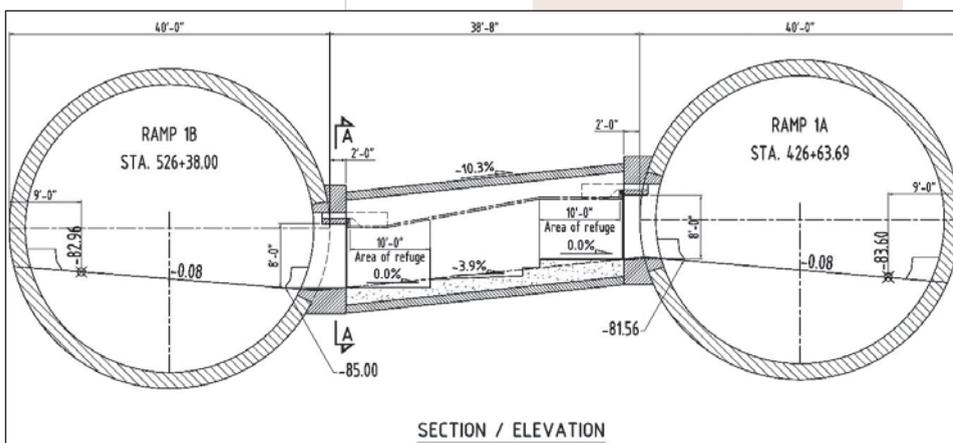
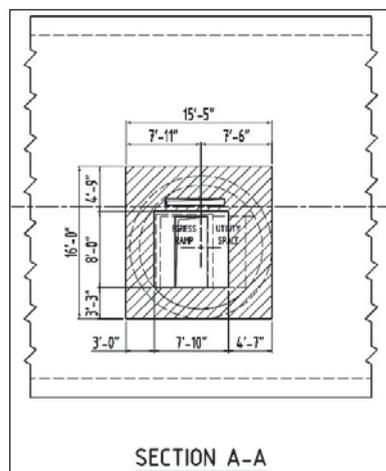
La demi-section gauche représente le tunnel en zone courante et la demi-section droite représente le tunnel

La congélation appliquée aux tunnels construits au tunnelier. Développements récents et perspectives

Figures 7 et 8  
Modèle de calculs et résultats après creusement du tunnel hors croisement et au croisement  
Calculation model and results after tunnel driving outside of the junction and at the junction



Figures 9 et 10  
Schéma des intertubes dans le projet  
Diagram of intertubes in the project



au droit du croisement avec le tunnel MTRC existant (figures 7 et 8).

Tunnels routiers de Miami – USA – Études 2007

Le projet des tunnels routiers de Miami propose de relier l'autoroute I395 au centre portuaire de la ville. Il permet alors de faciliter l'accès et de réduire le transit des camions dans le centre-ville (figures 9 et 10).

Les deux tunnels de 13 m de diamètre passent sous le chenal d'accès au port en dégagant un gabarit de navigation de 13 m et avec une couverture minimum de 5 m. Ils sont reliés par des intertubes piétons de 4 m de diamètre distants de 200 m. Trois intertubes sont sous le chenal de navigation, avec impossibilité de positionner quelque navire que ce soit dans le chenal, et quatre sont construits sous congélation. Leurs longueurs varient entre 4 et 10 m et ils sont représentés sur les figures 11 et 12.

Les tunnels et intertubes sont creusés dans des formations de sables coralliens d'une perméabilité extrême comprise entre E-2 et E0 m/sec. Seule la congélation des sols permet de creuser les intertubes en sécurité. L'étude a montré l'intérêt économique et technique de la solution ainsi que son efficacité dans les grands tunnels routiers.

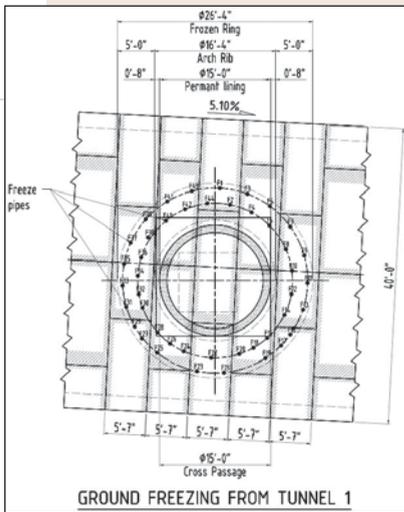
Pour la réalisation, la congélation à la saumure et à l'azote liquide seront comparées afin de choisir la solution la mieux adaptée en fonction de l'impact planning et de l'impact économique. Les calculs ont été faits à l'interface entre calcaire de Miami et sables coralliens qui ont des comportements différents.

Le résultat thermique est quasi insensible à ces écarts (figures 13 et 14).

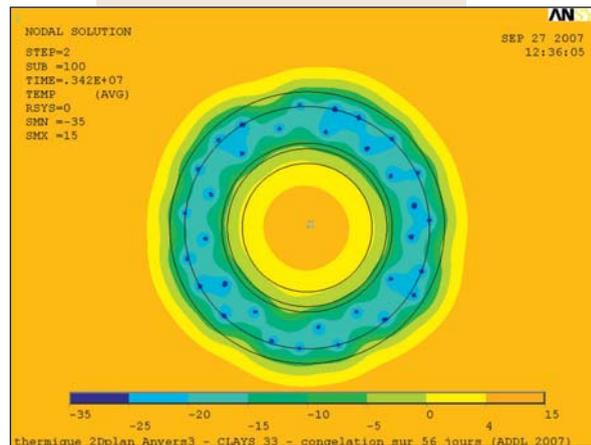
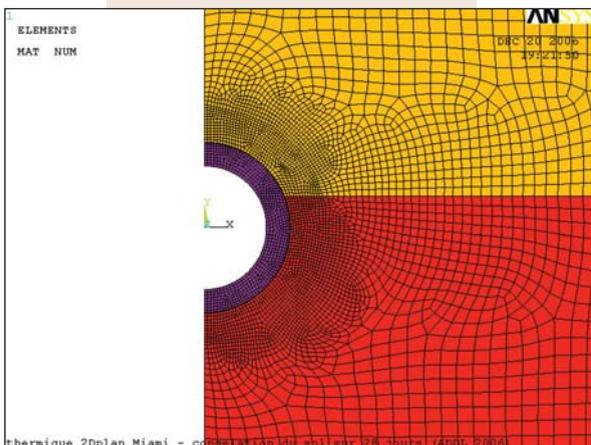
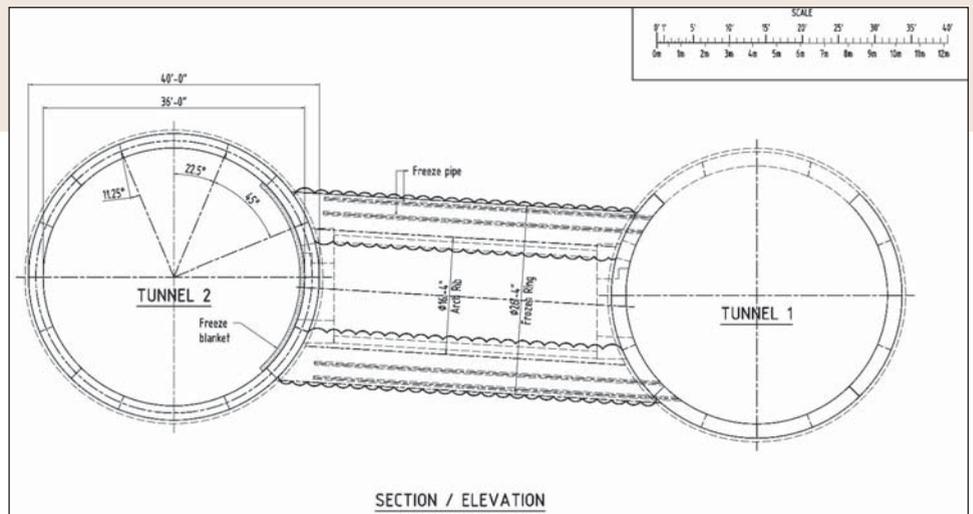
Tunnels d'Anvers – Belgique – Études 2007

Les tunnels d'Anvers permettent le passage de la ligne TGV en proximité de la ville d'Anvers. Les tunnels sont reliés par des intertubes d'une longueur de 8 m. Afin de faciliter le programme de construction, la congélation à l'azote et à la saumure ont été comparées en termes de forage, de durée de congélation, d'excavation et de coût. Les résultats sont très intéressants et montre que la congélation à l'azote liquide présente des avantages indéniables.

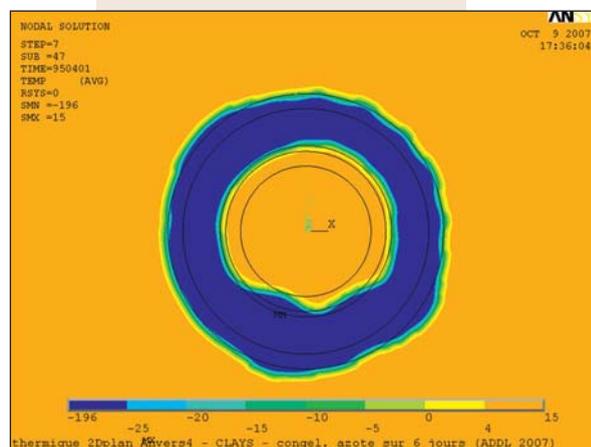
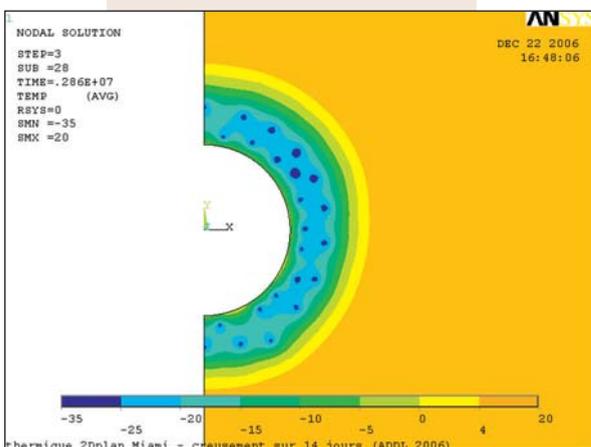
Les caractéristiques thermiques entre -100 °C et -200 °C sont beaucoup plus favorables qu'aux températures usuelles entre -5 °C et -15 °C. De ce fait, la congélation apparaît comme très rapide, chirurgicale et limitée dans l'espace. De plus, elle est beaucoup moins sensible aux types de sols (l'approche du zéro Kelvin se fait ici fortement sentir).



**Figures 11 et 12**  
**Détails de la congélation des intertubes**  
*Details of ground freezing for the intertubes*



**Figures 15 et 16**  
**Congélation à la saumure après 35 jours et à l'azote liquide après 6 jours**  
*Ground freezing with brine after 35 days and with liquid nitrogen after 6 days*



**Figures 13 et 14**  
**Modèle de calculs et calculs 2D de congélation des CP**  
*Calculation model and 2D calculations of CP ground freezing*

En 2 jours, l'anneau est fermé et entre 4 et 6 jours il est suffisamment résistant pour démarrer l'excavation. En comparaison, la congélation à la saumure demande 8 semaines avec 22 congélateurs (distance 1,1 m) et 5 semaines avec un schéma à 33 congélateurs (figures 15 et 16).

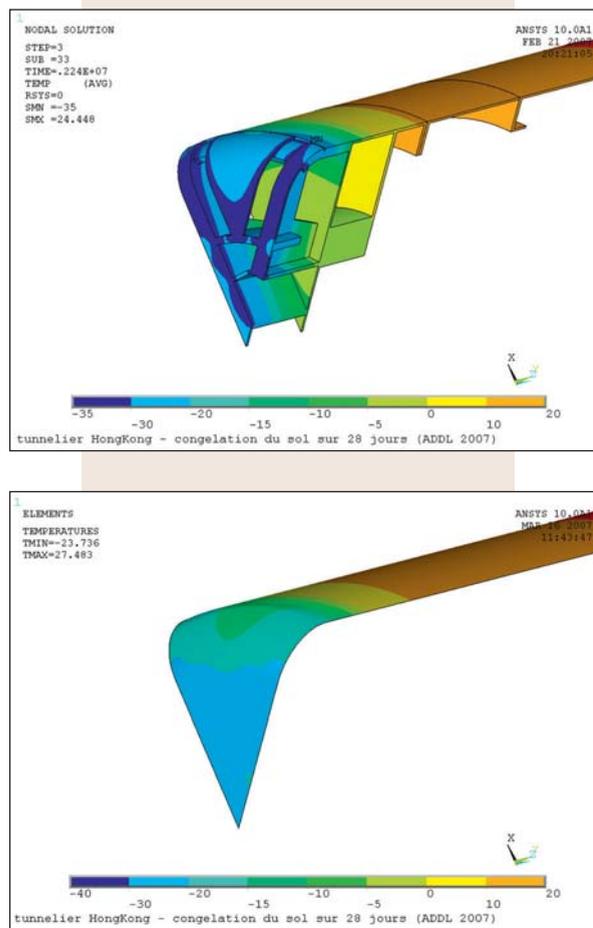
## ■ Développements actuels

Le groupe Bouygues Travaux Publics développe des techniques de congélation appliquées aux tunnels à grande profondeur et sous forte pression d'eau. L'intérêt étant de proposer aux clients nationaux et internationaux des solutions techniques satisfaisantes pour creuser dans des situations extrêmes n'autorisant pas d'accès en surface, (bras de mer, zone écologique, zone urbaine, sols à faibles caractéristiques). Ces déve-

## La congélation appliquée aux tunnels construits au tunnelier. Développements récents et perspectives

Figures 17 et 18

Carte de température sur le tunnelier et dans le sol à l'avant du tunnelier  
*Temperature map on the TBM and in the ground ahead of the TBM*



lancements sont faits sous budgets internes de R&D et sont protégés par des brevets européens.

Trois éléments sont particulièrement importants parmi ces considérations :

- les extrémités de tunnels (voir projet Portland);
- la maintenance du tunnelier (voir projet Chong Ming);
- les terrains perméables proches de la mer (voir Miami);
- la congélation à l'azote liquide (voir tunnel d'Anvers).

Les atouts de la congélation mis en avant sont essentiels dans ces considérations :

- sécurité des ouvriers par maîtrise du processus;
- contrôle permanent du circuit de congélation et de l'état du terrain;
- économie et fiabilité des installations de mise en froid.

### Break-in et break-out

Les dispositions de congélation sont classiques et ne demandent pas de particularités. L'étude porte sur l'impact du fonctionnement du tunnelier sur le sol

gelé, chaleur résiduelle, fonte du sol congelé, liquéfaction du sol dans la frange en décongélation, impact du temps de creusement en break-in et break-out. Les études de simulation sont prévues en 2008 avec une application en 2009.

### Maintenance du tunnelier

Les dispositions de congélation sont particulières et étudiées avec la machine. Bouygues TP utilise ici les développements de machines et les fonctionnalités qu'il impose au fabricant. Le principe s'appuie sur une machine métallique très conductrice, et sur des réseaux de congélateurs judicieusement positionnés en contact avec le corps du tunnelier (figures 17 et 18).

Les études portent sur la configuration de congélation intégrée avec le tunnelier et la vitesse de congélation du sol pour autoriser un accès en pression atmosphérique et une maintenance possible des corps critiques du tunnelier. La première expérimentation est prévue pour l'année 2009 avec possibilité de chantier en 2010.

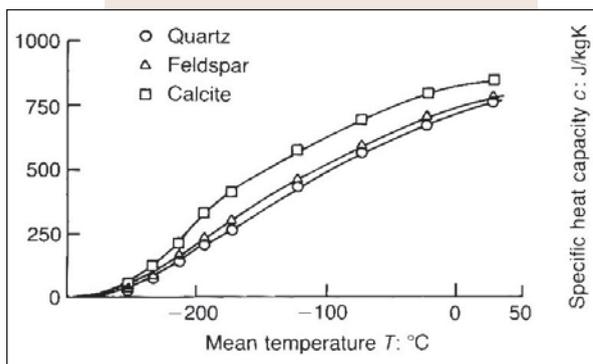
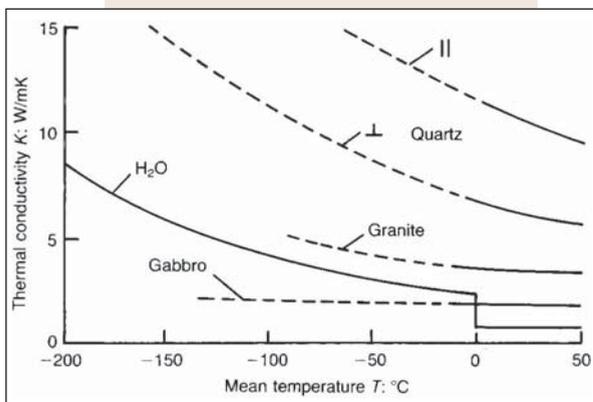
### Utilisation d'azote liquide

La circulation de liquides et gaz à basses températures (- 196 °C température de fusion de l'azote liquide) pose des problèmes d'hygiène et de sécurité particuliers et sévères. Ils demandent une réponse adaptée de façon à annuler leur impact pratique sur les ouvriers du chantier.

Localisation et protection des équipements, détection d'anomalie, conditions de travail à proximité et protection des ouvriers, sont étudiées en parallèle aux aspects thermiques de la mise en froid. Il est intéressant de noter la proximité au zéro Kelvin et l'impact sur conductivité (multipliée par 5) et chaleur massique (divisée par 3). Le traitement devient très précis et chirurgical, en conséquence le transfert de frigorie est limité et économique (figures 19 et 20). Les études sont faites en 2007 avec application projet en 2008.

### Perspectives et conclusions

La congélation est une technique sûre et précise, maîtrisée dans le temps et l'espace. C'est une technique moderne qui s'adapte parfaitement à la construction au tunnelier. Son champ d'application est vaste et limité uniquement par la mise en place des congélateurs et l'alimentation du liquide de refroidissement. Elle permet d'aborder des problèmes nouveaux de construction à grande profondeur sous forte pression d'eau. Atteindre 100 m est aujourd'hui faisable, ce qui permet d'envisager des traversées jusque-là interdites



Figures 19 et 20

Évolutions des caractéristiques thermiques à températures cryogéniques

Curves of thermal characteristics at cryogenic temperatures

par les analyses de risque et les discussions avec les assureurs.

Ce pas technologique est possible grâce à l'utilisation inédite de la congélation pour la maintenance, la réparation et le traitement d'incidents et d'accidents machine sur le tunnelier. Les études menées en R&D par le groupe Bouygues Travaux Publics montrent des possibilités pertinentes et économiques.

Le développement des possibilités de simulation numérique associé à la très bonne fiabilité des mesures thermiques en fait une technique sûre et pérenne. L'expérience, la compétence et la précision des équipes techniques de bureau d'études et de chantier garantissent d'envisager sereinement le passage aux grandes profondeurs. ■

## ABSTRACT Soil freezing applied to TBM tunnels – Recent experience and developments

O. Martin, P. Longchamp, D. Michel,  
Fr. Vallon

Tunnelling dream is to develop machine able to work at great depth under high water pressure. Recently, TBM have progressed toward this goal but the works at atmospheric pressure for the connections to the tunnels and for the maintenance/repair of the machines are still difficult, costly and risky for the workers.

Soil freezing represents the state of the art technique to solve the most difficult problems of tunnelling. It is really the counterpart of TBM construction.

Bouygues Travaux Publics, through its past experience, multidisciplinary expertise and its continuous investment in R&D is foreseeing pertinent and economical solutions.

This article overviews internal recent projects and their teaching, then presents the various research research programmes on going in order to reach safe working conditions.

## RESUMEN ESPAÑOL La congelación aplicada a los túneles construidos mediante tuneladora – Desarrollos recientes y perspectivas

O. Martin, P. Longchamp, D. Michel  
y Fr. Vallon

Construir a 100 metros de profundidad en suelos permeables y bajo fuerte carga de agua constituye un challenge que todavía no se ha controlado perfectamente. Pese a que las tuneladoras hayan progresado, queda por resolver el problema de los pozos de acceso/salida, las conexiones, del mantenimiento maquinaria y de las intervenciones derivadas de los riesgos geológicos.

La congelación es una técnica probada, fiable y controlada que permite construir según estas condiciones difíciles y se presenta como complementaria a las tuneladoras más elaboradas. Bouygues Travaux Publics, por medio de diversas experiencias anteriores, de competencias internas multidisciplinarias y sus inversiones en I+D vislumbra posibilidades pertinentes y económicas.

El presente artículo propone una vista global de los proyectos recientes y sus enseñanzas y abordar las perspectivas futuras de desarrollo interno de las técnicas de forma a alcanzar condiciones seguras de trabajo.

# Principauté de Monaco

## Urbanisation des terrains

À l'issue de la mise en service de la gare souterraine de Monaco en octobre 1999, le Service des Travaux publics de la Principauté a lancé la réalisation des infrastructures du projet d'urbanisation des anciens terrains SNCF, désormais disponibles.

Le chantier s'étend sur 1,5 km entre Sainte-Dévote et la frontière à Cap d'Ail.

Un premier tronçon avait déjà été mis en souterrain en 1964 pour faire place à l'actuel boulevard du Larvotto.

Le projet, d'un montant prévisionnel de 160 millions d'euros, couvre une superficie de 4 ha. Coyne et Bellier assure la maîtrise d'œuvre de ce projet important qui comporte un ensemble d'ouvrages souterrains composé de tranchées couvertes, de tunnels et de galeries techniques. Les missions de contrôle pour la conception et la réalisation ont été confiées au bureau Socotec.

Réalisés en plusieurs tranches, ces travaux précèdent la construction d'autres ouvrages en superstructures (logements domaniaux, équipements publics, parkings...).

Les ouvrages ainsi créés reconstituent une dorsale souterraine qui prolonge le boulevard du Larvotto et complète la traversée routière de la Principauté. Le projet comporte également une galerie technique continue destinée à recevoir les réseaux fluides et électriques alimentant les nouveaux quartiers.

La conception et la réalisation de ces infrastructures se déroulent dans le respect de contraintes fortes liées à un site urbain majeur : densité du tissu urbain, main-

tien de la circulation, respect de critères sévères liés aux nuisances sonores, vibratoires et aux déplacements des existants.

Depuis le mois de janvier 2000, les infrastructures de trois secteurs ont été achevées donnant la possibilité de réaliser des programmes de superstructures (figure 1).

### ■ Déroulement de l'opération

Pour permettre la réalisation des programmes de logements et d'équipements publics au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'infrastructures, le projet a été découpé en ensembles de lots correspondant aux îlots d'urbanisation.

Les chantiers de démolition, voiries provisoires, dévoiement de réseaux et d'équipements des galeries techniques sont déclenchés à l'avancement suivant les nécessités du projet.

Par souci d'homogénéité des matériels et pour éviter les problèmes d'interface, les lots techniques portent sur l'ensemble du réseau souterrain : réseau d'appel d'urgence, vidéosurveillance, détection automatique d'incident, ventilation et désenfumage.

Les travaux progressent depuis le viaduc Sainte-Dévote jusqu'à la frontière à Cap d'Ail en suivant le tracé de l'ancienne voie SNCF.

À fin novembre 2007, 45 marchés de travaux ont été lancés sur cette opération.

### ■ Les grands ensembles

Les travaux ont débuté en janvier 2000 par la réalisation du premier tronçon de galerie technique à l'est du projet par l'entreprise Carillion BTP.

Construit entre juin 2000 et août 2001 par le groupe d'entreprises JB Pastor & Fils – Fougerolle-Borie dans le secteur Auréglija, l'ensemble B est l'ouvrage le plus au nord du projet. Il s'agit d'un demi-échangeur de 290 m de long qui établit la liaison entre le boulevard du Larvotto et l'entrée en terre de la tranchée couverte tout en assurant la desserte du débarcadère de la gare SNCF. Le montant des travaux de cette première tranche atteint 4 millions d'euros.

Les travaux de l'ensemble G, confiés à l'entreprise JB Pastor & Fils avec la collaboration de Sitren et Carillion BTP, se sont déroulés entre août 2002 et février 2004 dans le secteur Grimaldi. Cet ouvrage long de 190 m est le premier tronçon couvert du projet. Il comporte une tranchée couverte de 2 x 1 voie, un giratoire semi-enterré qui permet la desserte du quartier de la Condamine et une galerie technique double sous le radier des ouvrages. Le montant des travaux est de 11 millions d'euros (photos 1 et 2).

Figure 1

Vue en plan de l'ensemble du projet  
Plan view of the project as a whole



# SNCF – Infrastructures



Photo 1

Vue sur les ensembles B et G depuis l'ancien pont Prince Pierre

View of sections B and G from the old Prince Pierre Bridge

Inséré dans le secteur Castelleretto – Prince Pierre, l'ensemble H1 prolonge la tranchée couverte et les galeries techniques sur une longueur de 105 m et reconstitue l'ancien pont Prince Pierre qui enjambait anciennement la voie ferrée. Il comprend la première station de ventilation et de désenfumage ainsi que le centre de contrôle du réseau souterrain. Les travaux, d'un montant de 22 millions d'euros, ont été réalisés entre février 2004 et décembre 2006 par le groupement JB Pastor & Fils - Eiffage TP - Sitren.

Les travaux du tunnel T33 – Ensemble K sont en cours depuis le mois de janvier 2006 avec une fin prévue en juin 2008. Il s'agit de creuser un tunnel au rocher de 140 m dans un environnement d'ouvrages sensibles. Les deux têtes sont aussi d'exécution délicate car réalisées dans des fouilles profondes en sous-œuvre de voies de circulation en service. Le tunnel constituera la voie principale de sortie de Monaco vers Cap d'Ail. L'ensemble comprend également la construction en tranchée couverte à l'abri d'un soutènement berlinois de 210 m de galeries techniques supplémentaires. Le montant des travaux de cette opération, attribuée au groupement Richelmi - Solétanche SAM - Solétanche Bachy Tunnels - Sivia'M, avoisine les 25 millions d'euros.

Démarrés en novembre 2006 dans le secteur Rainier III, les travaux de l'ensemble I sont en cours pour une durée prévisionnelle de 30 mois. Cet ensemble poursuit la tranchée couverte et les galeries techniques sur 210 m et établit la liaison entre la dorsale souterraine

et le tunnel de sortie de Monaco qui permet d'accéder directement à la RD 6007 (ancienne RN7).

Il comprend un giratoire enterré et la construction des amorces de quatre tunnels destinés à desservir le quartier de Fontvieille et offrir un débouché au réseau existant des tunnels sous le rocher. La liaison boulevard du Larvotto – sortie de Monaco devrait être opérationnelle fin 2008. L'ouvrage est particulièrement complexe puisqu'il est calculé pour supporter les bâtiments futurs. Le montant de cet ensemble, le plus important du projet, atteint 30 millions d'euros. Sa réalisation a été confiée au groupement SGTm - GTM GCS - Botte Fondations.

L'aménagement de l'îlot Charles III, le plus au sud du projet, n'est pas traité par un ensemble unique mais par plusieurs ouvrages dont certains s'insèrent au cœur de projets immobiliers dont la construction a été anticipée. Il s'agit principalement de prolonger le système de galerie technique jusqu'à la frontière à Cap d'Ail et de créer un bassin d'orage automatisé de 1 500 m<sup>3</sup> destiné à limiter les écoulements en mer du déversoir d'orage de Fontvieille. Démarré en 2004, ce secteur devrait être achevé en même temps que le dernier grand ensemble de l'opération, l'ensemble J.

L'ensemble J constitue le dernier maillon du projet. Il connectera les ensembles K et I au quartier de Fontvieille ainsi qu'au réseau des tunnels sous le rocher. Le phasage de réalisation est très complexe car le projet prévoit la réalisation sous circulation des ouvrages de raccordement du réseau souterrain aux voies existantes et en particulier, la démolition et la reconstruction de la tête d'un tunnel en service. Les travaux devraient être enchaînés avec l'ensemble I pour une mise en service complète de l'infrastructure fin 2010.



**Sohrab Baghery**  
Directeur de projet  
Coyne et Bellier



**Fabrice Fernandez**  
Représentant  
de la maîtrise d'œuvre  
Coyne et Bellier



**Emmanuel Mendès**  
Responsable d'affaire  
Socotec

Photo 2

Ensemble G, entrée dans la tranchée couverte côté boulevard du Larvotto

Section G, cut-and-cover entrance on the Larvotto boulevard side

## Principauté de Monaco. Urbanisation des terrains SNCF – Infrastructures

Photo 3

Ensemble K, tunnel T33, terrassement de la galerie technique sous des conduites de gros diamètre supportées par une structure métallique

*Section K, T33 tunnel, earthworks in the main services duct under large-diameter conduits supported by a steel structure*



Photo 4

Ensemble H1, déviation préalable des réseaux du boulevard Rainier III avant réalisation sous circulation de la dalle supérieure des niches de ventilation et de désenfumage

*Section H1, preliminary diversion of the networks on Rainier III boulevard before execution, under traffic, of the upper slab for the ventilation and smoke control recesses*



Photo S. Ponziani/Service des Travaux publics

### ■ Les contraintes majeures du projet

#### Les réseaux existants

Dans un environnement fortement urbanisé, la quasi-totalité des ouvrages à construire se situe sur des emprises occupées par des réseaux existants. Il est donc nécessaire, soit de les dévier au fur et à mesure de l'avancement des travaux avec des phasages complexes liés au maintien des voies en circulation, soit de les maintenir en lieu et place en assurant leur suspension en cas de terrassement sous-jacent (photos 3 et 4).

Les interventions sur les réseaux d'assainissement sont des opérations délicates qui nécessitent de mettre en place des procédures particulières. En effet, la soudaineté et la violence des orages méditerranéens associées à une topographie accidentée des bassins versants imposent souvent de programmer ces travaux en

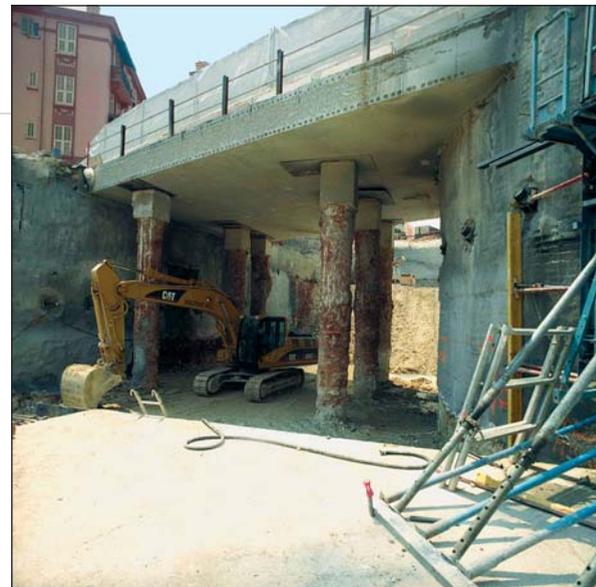


Photo 5

Ensemble G, construction de la tranchée couverte en sous-œuvre de la rue de la Turbie. Une partie de la dalle du cadre repose sur des appuis profonds (pieux béton armé Ø 800), ce qui permet de maintenir la circulation lors des terrassements et de la construction de la partie inférieure de l'ouvrage

*Section G, construction of the cut-and-cover tunnel with underpinning of La Turbie Street. Part of the slab for the frame rests on supports cast in drilled shafts (reinforced concrete piles of dia. 800 mm), allowing traffic to be maintained during the earthworks and construction of the lower part of the structure*

dehors des périodes à risque, à savoir octobre et novembre ainsi qu'au mois d'août.

Lorsque les contraintes de programmation et la durée des chantiers exigent des travaux pendant ces périodes, il convient de mettre en place un suivi météo rigoureux et d'être en mesure de reconditionner provisoirement et rapidement les réseaux d'assainissement partiellement démolis ou dévotés.

Les travaux sont également menés en coordination avec le Service de l'Aménagement Urbain de la Principauté qui peut modifier les limiteurs de débit à l'amont et réduire ainsi le débit dans la canalisation en travaux.

Par ailleurs, et lors de la réalisation de terrassements et de perforations (sondages carottés, pieux ou micro-pieux) à proximité de réseaux en service, des reconnaissances préalables par sondages manuels sont indispensables afin de connaître précisément leur position. Il est souvent nécessaire de réaliser des avant-trous et de poser des tubages.

#### Maintien des voies en circulation

Compte tenu de l'importance du trafic journalier (en semaine, entre 80 000 et 100 000 véhicules entrent et sortent de la Principauté chaque jour), le Service des

Travaux publics demande le maintien en service de toutes les voies de circulation pendant les travaux.

Plusieurs cas de figure ont été rencontrés :

- construction de voiries provisoires et dévoiement par phases des axes de circulation situés sur l'emprise des ensembles à construire;
- maintien des voies sur des dalles profondées et réalisation des ouvrages en sous-œuvre (photos 5 et 6);
- construction de tunnels de petite section sous faible couverture ou bien emploi de techniques de fonçage.

Les conduites raccordant le bassin d'orage au déversoir de Fontvieille ont été posées dans un mini-tunnel de 36 m de long sous le boulevard Charles III (photo 7). Dans l'ensemble H1, une galerie piétonne de 15 ml a été réalisée sous le boulevard Rainier III qui constitue l'axe de desserte principal du quartier de Fontvieille.

### Déplacement des existants

Le tissu urbain très dense de la Principauté impose de réaliser les ouvrages à proximité immédiate, voire en sous-œuvre des constructions existantes. Des critères prudents de déplacement des parois de soutènement ont été fixés par le concepteur afin d'éviter l'apparition de tout désordre. Il s'agit de limites imposées aux calculs de dimensionnement dont les valeurs les plus courantes sont rappelées ci-après :

- 10 mm, si la fondation ou le mur d'un immeuble, d'une maison ou d'un ouvrage jugé sensible par le maître d'œuvre se situe à plus de 5 m de la paroi;
- 3 mm dans le cas de voisinage d'un ouvrage jugé sensible par le maître d'œuvre.

En phase chantier, les bâtiments sont systématiquement équipés de cibles ou de prismes pour des auscultations topographiques. Les contrôles sont ensuite effectués à un rythme, au minimum hebdomadaire, lors des phases de terrassement. Les déplacements mesurés sont ensuite comparés aux seuils d'alerte et d'intervention fixés respectivement à 2 et 3 mm pour les ouvrages sensibles.

Par mesure de précaution et avant démarrage des travaux, des constats d'huissier contradictoires sont réalisés sur les constructions avoisinantes, ce qui permet de détecter les ouvrages ayant une fragilité ou des désordres particuliers et d'adopter des mesures compensatoires comme par exemple :

- des critères de déplacement plus restrictifs;
- une instrumentation complémentaire comme par exemple des fissuromètres relevés chaque semaine.

### Parois de soutènement

À partir des critères de déplacement, le bureau Coyne et Bellier a conçu et prédimensionné des soutènements adaptés aux terrains rencontrés qui sont, en

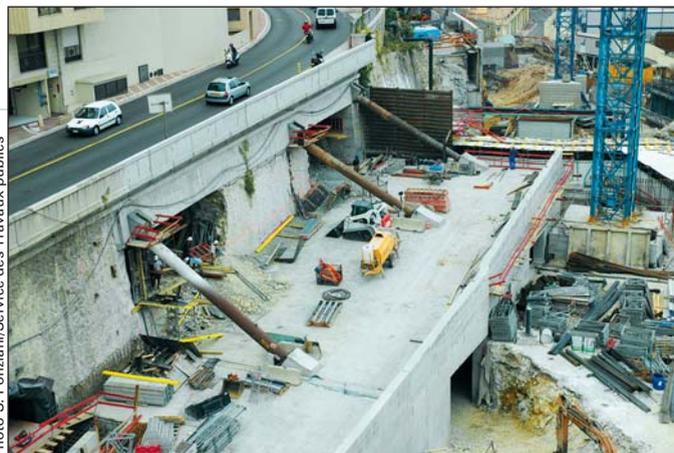


Photo S. Ponziani/Service des Travaux publics

Photo 6

Ensemble H1, construction des niches de ventilation et de désenfumage en sous-œuvre du boulevard Rainier III. La chaussée est supportée par la dalle supérieure profondée sur micropieux

*Section H1, construction of the ventilation and smoke control recesses with underpinning of Rainier III boulevard. The roadway is supported by the upper slab cast in drilled shafts on micropiles*

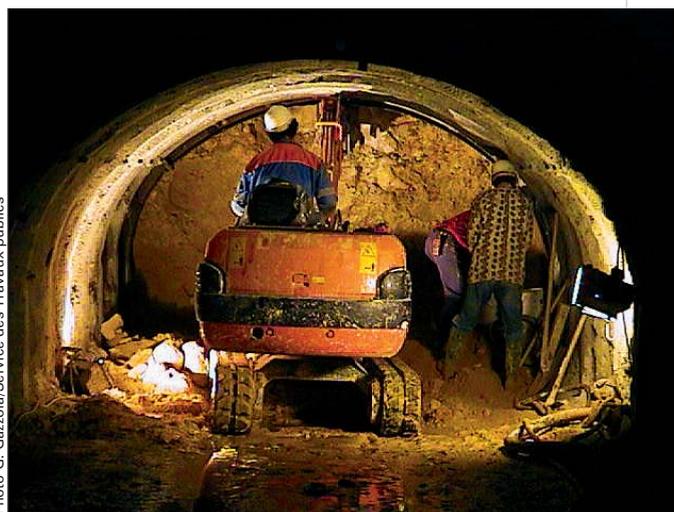


Photo G. Garzola/Service des Travaux publics

Photo 7

Construit par le groupement des entreprises Sitren, SAM JB Pastor & Fils, SGTM, GTM GCS, le bassin d'orage de l'ensemble A2 a nécessité le creusement d'une galerie de petite section sous le boulevard Charles III, axe principal de sortie de la Principauté

*Constructed by the consortium of Sitren, SAM JB Pastor & Fils, SGTM and GTM GCS, the stormwater tank for section A2 required the excavation of a narrow gallery under Charles III boulevard, the main road artery going out of the Principality*

dehors de deux zones de calcaire du Jurassique situées au nord du projet et au niveau du tunnel T33, constitués majoritairement :

- d'une couche de plusieurs mètres d'éboulis de pente composée de cailloutis ou de blocs calcaires plus ou moins gros (dans certains secteurs ils peuvent atteindre plusieurs mètres) enrobés dans une matrice argileuse voire sableuse;
- d'une couche d'altération du substratum marno-calcaire du Crétacé;
- du substratum marno-calcaire du Crétacé.

Il n'y a pas de nappe, mais des cheminements préférentiels de l'eau à l'interface éboulis-substratum peuvent exister.

Principauté de Monaco. Urbanisation des terrains SNCF – Infrastructures

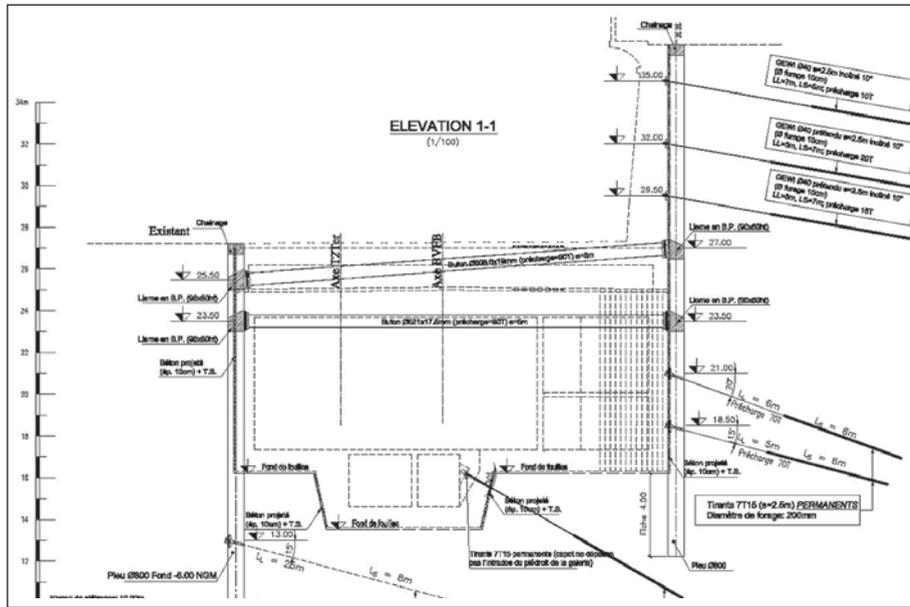


Figure 2

Exemple d'un profil de soutènement conçu pour l'ensemble I  
 Example of a supporting structure profile designed for section I

chaque réunion de chantier afin de décider de mesures de renforcement éventuelles (photos 9 et 10). En milieu urbain, l'expérience montre que les phases d'injection au coulis de ciment des tirants et des micropieux sont des opérations particulièrement délicates vis-à-vis des avoisinants compte tenu des risques de remplissage de réseaux, galeries et autres ouvrages enterrés. Une attention particulière doit donc être portée aux reconnaissances préalables, aux incidents de forage, comme par exemple les pertes d'air ainsi qu'aux volumes injectés. Une surveillance des avoisinants proches est souvent requise pendant ces travaux.

Suivi des vibrations

En ville, les vibrations liées aux excavations de terrains rocheux par des moyens mécaniques de type brise-roche ou à l'explosif, la démolition d'ouvrages, le recépage de paroi ou le compactage de chaussée sont

Photo 8

Les terrassements de l'ensemble I se poursuivent dans les éboulis à l'abri de parois berlinoises équipées de butons et de tirants

The earthworks for section I continue in the rubble sheltered by Berlin-type retaining walls provided with stays and tie anchors



Photo 9

Tête de tirant équipée d'une cellule de mesure à lecture directe

Tie anchor head provided with a direct-readout measuring cell



Les dispositifs de soutènement adoptés sont des parois berlinoises fondées sur pieux ou micropieux soutenues par des butons préchargés ou des tirants actifs selon la disponibilité des tréfonds sous les constructions avoisinantes (figure 2 et photo 8).

La mise en précharge des butons, ou la mise en tension des tirants, a pour objectif de mettre le terrain en état de butée à l'arrière du soutènement afin de limiter les déplacements induits par la mise en poussée active du sol.

En phase chantier et en complément des auscultations topographiques, des contrôles hebdomadaires de la tension des tirants et de la charge dans les butons sont effectués au moyen des outils suivants :

- cellules de pression à lecture directe ou déportée posées sur des tirants témoins;
- vérins plats équipés de manomètre pour la totalité des butons.

Des comptes rendus hebdomadaires sont diffusés par les entreprises. Ils sont analysés et commentés lors de

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Service des Travaux Publics de la Principauté de Monaco

Maitrise d'œuvre

Coyne et Bellier

Bureau de contrôle

Socotec Monaco

Entreprises

- AL.Ber.Ti (terrassements)
- Benedetti (peinture)
- Botte Fondations
- Carillion BTP
- Climatherm (plomberie)
- Crystal SAM (plomberie - ventilation)
- DCI (instrumentation vibrations, minage)
- Eiffage TP - Sitren
- GTM GCS - SGTM
- Idetech (instrumentation vibrations)
- Industrie du Bâtiment SAM
- JB Pastor & Fils SAM
- Jean Lefèvre SAM (VRD)
- LTP (réseau d'appel d'urgence)
- Monaco Étanchéité
- Presspali France (fondations spéciales)
- Richelmi SAM
- Sadi Richard (vidéosurveillance)
- SIVIA'M (VRD)
- Solétanche SAM - Solétanche Bachy Tunnels
- Trafiparc (DAI)
- Tubino (peinture)
- SEE (travaux électriques - serrurerie)
- Squarélectric (travaux électriques - serrurerie)

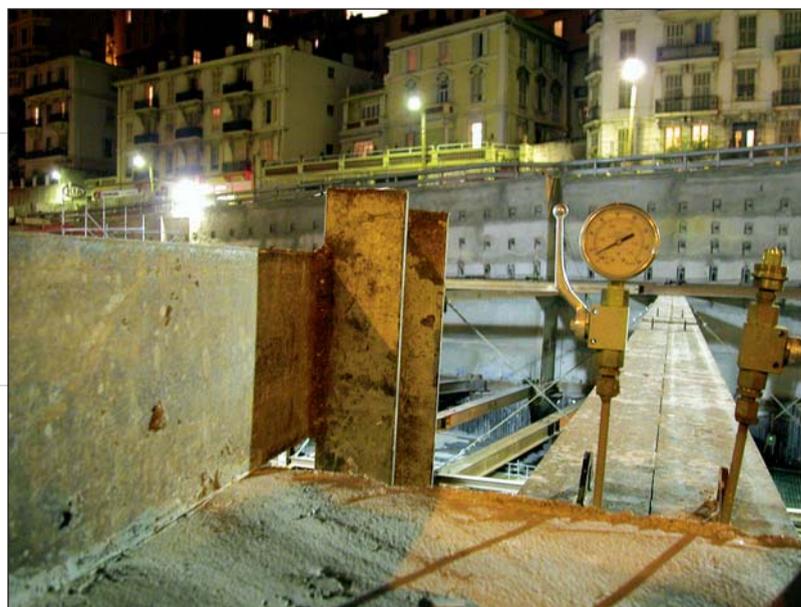
Autres intervenants

- Setec TPI : partenaire, étude d'avant-projet et des ensembles A et B
- Fimatec SAM, MIP, Elyss : études techniques

Photo 10

Manomètre monté sur un vérin plat permettant la mise en compression d'un buton de l'ensemble I

*Pressure gauge mounted on a flat cylinder allowing compressive stressing of a stay for section I*



susceptibles d'occasionner des désordres aux avoisinants. Les sollicitations générées sont différentes selon les méthodes utilisées :

- pour les brise-roches et les compacteurs, il s'agit de sollicitations de longue durée générant des vitesses particulières peu élevées en valeur absolue mais associées généralement à de basses fréquences ;
- pour l'explosif utilisé en tirs séquentiels, les sollicitations sont de courte durée mais génèrent des vitesses particulières plus élevées à des niveaux de fréquence également plus importants.

Les seuils généralement prescrits par le concepteur sont prudents et tiennent compte de l'environnement urbain.

**Seuils d'alerte :**

- 3 mm/s pour le domaine fréquentiel entre 2 Hz et 8 Hz ;
- 5 mm/s pour le domaine fréquentiel entre 8 Hz et 30 Hz ;
- 6 mm/s pour le domaine fréquentiel supérieur à 30 Hz.

**Seuils d'arrêt :**

- 5 mm/s pour le domaine fréquentiel entre 2 Hz et 8 Hz ;
- 6 mm/s pour le domaine fréquentiel entre 8 Hz et 30 Hz ;
- 8 mm/s pour le domaine fréquentiel supérieur à 30 Hz.

Pour des projets particuliers et notamment pour le tunnel T33, ces seuils ont été abaissés pour tenir compte de conditions de creusement sous des ouvrages très sensibles.

En phase chantier, des capteurs de vibration sont installés sur la totalité des bâtiments et ouvrages sensibles situés à proximité du projet (photo 11).

Les enregistrements se font en continu 24 heures sur 24 de manière à pouvoir déceler également les vibrations indépendantes de l'activité du chantier et mieux corrélérer ainsi les vibrations aux différentes phases de travaux.

Avant toute utilisation d'explosif, des tirs d'essai permettent de déterminer la charge unitaire qui sera mise en œuvre dans les tirs séquentiels.

Comme pour les auscultations topographiques et le suivi des précharges des butons et des tirants, les entreprises diffusent des comptes rendus hebdomadaires qui sont analysés et commentés lors de chaque réunion de chantier. La fréquence de ces rapports peut devenir quotidienne si les nécessités du chantier l'exigent, comme par exemple le percement du tunnel T33 sous une galerie technique contenant des conduites d'eau anciennes en charge, ou sous les locaux techniques du tunnel Rainier III. Les charges unitaires peuvent alors être modulées et les méthodes adaptées en fonction des résultats obtenus après chaque tir (photo 12).



Photo 11

Capteur de vibration fixé sur la paroi rocheuse du tunnel Rainier III dans le cadre des travaux du tunnel T33

*Vibration sensor attached to the rock wall of Rainier III tunnel during work on the T33 tunnel*

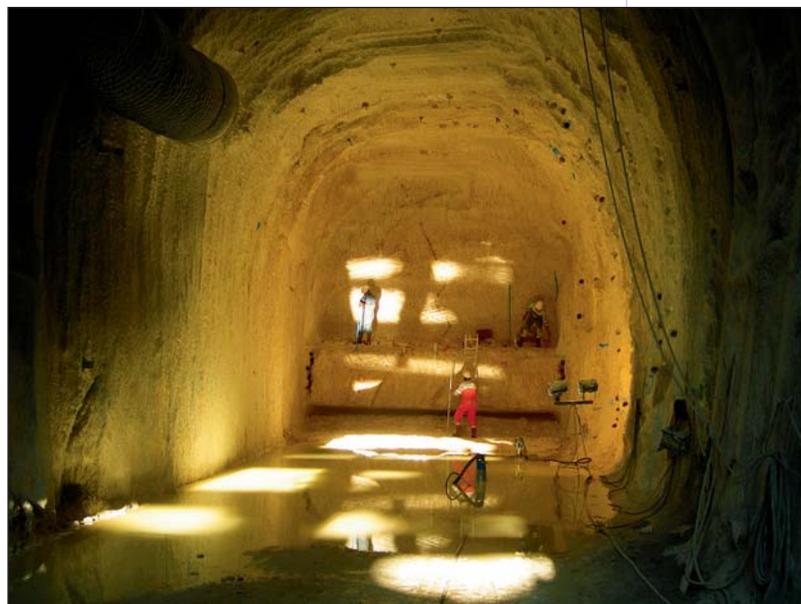


Photo 12

Tunnel T33, ensemble K, chargement d'un tir de banquette après prédécoupage et fraisage de la section pour limiter les niveaux de vibration sous les locaux techniques du tunnel Rainier III en service

*T33 tunnel, section K, blast charging for a bench after pre-cutting and milling of the section to limit the vibration levels under the plant rooms of the Rainier III tunnel in service*

Photo G. Gazzola/Service des Travaux publics

► ■ **Conclusions**

Le chantier de l'urbanisation des délaissés SNCF est un projet complexe en raison, non seulement des contraintes d'un tissu urbain très dense à proximité immédiate des ouvrages à construire, mais également par la multiplicité des configurations rencontrées, ce qui a conduit à adapter en permanence les techniques de construction ainsi que les méthodes d'observation des avoisinants.

Le dialogue et l'échange constructifs entre le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et le bureau de contrôle, notamment en phase de conception d'une part, et les entreprises chargées de construction avec des moyens technologiques propres en phase d'exécution d'autre part, ont permis la réalisation de ces ouvrages importants au service des besoins de la Principauté. ■

**ABSTRACT**

**Principality of Monaco.  
Urbanisation of railway  
land – Infrastructure**

*S. Baghery, F. Fernandez, E. Mendès*

*Following commissioning of the Monaco underground train station in October 1999, the Public Works Department of the Principality began execution of the infrastructure for the project for urbanisation of former railway land, now available. The project extends over 1,5 km between Sainte-Dévote and the border at Cap d'Ail.*

*The project, for an estimated amount of 160 million euros, covers an area of 4 ha. Coyne et Bellier is project manager for the project, which comprises a set of underground structures consisting of cut-and-covers and tunnels.*

*Two major projects are underway :*

- *The T33 tunnel - section K which comprises a 140-metre tunnel dug under sensitive structures;*
- *Section I, which is the main point of exchange for the underground track. It includes an underground roundabout, 140 m of cut-and-cover and 4 cross-passages. The structure of the works has been designed to bear the future buildings.*

*The project will be completed in 2010 with a final section which will establish the interconnection between the projects underway and the De Fontvieille district.*

**RESUMEN ESPAÑOL  
Principado de Mónaco.  
Urbanización de los  
terrenos SNCF –  
Infraestructuras**

*S. Baghery, F. Fernandez y E. Mendès*

*Al final de la puesta en servicio de la estación subterránea de Mónaco en octubre de 1999, el Servicio de Obras Públicas del Principado ha iniciado la ejecución de las infraestructuras del proyecto de urbanización de los antiguos terrenos SNCF, actualmente disponibles. La obra se extiende sobre 1,5 km entre Sainte-Dévote y la frontera en Cap d'Ail.*

*El proyecto, de un importe provisional de 160 millones de euros, abarca una superficie de 4 hectáreas. Coyne et Bellier asegura la dirección del proyecto que incluye un conjunto de estructuras subterráneas compuesto por falsos túneles y por túneles.*

*Dos obras importantes se encuentran actualmente en curso :*

- *el túnel T33 - conjunto K que consta de un túnel de 140 m excavado bajo diversas estructuras sensibles;*
- *el conjunto I que corresponde al punto de intercambio principal de la vía subterránea. Este conjunto incluye un centro giratorio enterrado, 140 m de falso túnel et 4 vías de enlace. La estructura de las obras se ha diseñado para soportar los futuros edificios.*

*El proyecto finalizará en 2010 con un último tramo que permitirá la interconexión entre las obras en curso y el barrio de Fontvieille.*

# Monaco.

## Le tunnel T33



**Julien Cornier**  
Géologue chantier  
Solétanche Bachy  
Tunnels



**Cyril Chaubert**  
Ingénieur travaux  
Solétanche Bachy  
Tunnels

**L'ouvrage T33 à Monaco fait partie du projet d'urbanisation des anciens terrains de la SNCF.**

**Il s'agit d'un tunnel routier au rocher de 150 m de longueur et de 55 à 85 m<sup>2</sup> de section excavée. Les méthodes de creusement utilisées nous ont permis de réduire l'impact des vibrations sur les ouvrages très sensibles situés à proximité.**

### ■ Présentation générale

En dépit de la volonté politique du Prince de développer les transports en commun et le covoiturage, près de 30 000 personnes empruntent leur voiture pour venir travailler sur le territoire de la principauté et la circulation automobile constitue une des principales nuisances subies par les Monégasques. Les autorités, conscientes du problème, ont initié un plan d'urbanisation dans le quartier de l'ancienne gare SNCF. Il comprend un ensemble de voiries souterraines composées de tranchées couvertes et de tunnels.

Réalisés en plusieurs tranches, ces travaux ont démarré en 2000 et précèdent la construction d'autres ouvrages en superstructure.

Le Service des Travaux Publics de Monaco a attribué au bureau d'études Coyne-et-Bellier la maîtrise d'œuvre de l'ensemble de ce projet d'urbanisation des délaissés SNCF.

Le contrat de l'ensemble K (tunnel T33) est l'un des différents lots constituant le projet. Il comprend la réalisation d'une galerie technique de 150 m de longueur pour abriter les réseaux sous la route en pieds de falaise, et un tunnel au rocher de 55 à 85 m<sup>2</sup> de section excavée et de 140 m de long, ainsi que des travaux de génie civil sur les têtes amont et aval du tunnel.

Ce marché a été attribué au groupement Richelmi - Solétanche SAM - Solétanche Bachy Tunnels - Sivia'm. Richelmi, mandataire du groupement, réalise le génie civil, Solétanche SAM les travaux spéciaux et les terrassements extérieurs, Solétanche Bachy Tunnels l'excavation et le bétonnage du tunnel au rocher, enfin Sivia'm réalise les travaux de réseaux et de chaussée en tunnel et en extérieur.

Le tunnel T33 reliera la place du Canton à la sortie sud de Monaco en direction de Nice. Il est creusé en bordure de la falaise du jardin exotique, plonge sous l'un des piédroits du tunnel montant (T7) et ressort sous un ensemble d'éboulis mégalithiques à intercalations de poches sableuses après avoir quitté le calcaire dolomitique d'âge jurassique.

Ce projet concentre un nombre important de

contraintes environnementales liées au creusement de tunnel en site urbain majeur :

- la gestion et la minimisation des nuisances sonores;
- la gestion des poussières;
- le respect des critères vibratoires dans un environnement immédiat très sensible (habitations et bureaux, grottes du jardin exotique, tunnel en service, falaise subverticale avec rochers et blocs potentiellement instables, galeries techniques en service...), au-dessus et en dessous des voies de circulation;
- l'existence de courants vagabonds pouvant être générés par la mise à la terre d'un transformateur 20 kV;
- les phasages complexes de travaux liés à des circulations denses.

La préparation minutieuse du chantier et le respect des critères prescrits au moyen de méthodes originales ont été mis au service de la réalisation de cet ouvrage très spécifique (photo 1).



### ■ Le contexte géologique

Le projet d'implantation du tunnel T33 intéresse l'écaïlle calcaire de Monaco, unité géologique de l'Arc de Nice. Cette unité est située au front des chaînes subalpines orientales mis en place lors de la surrection des massifs alpins méridionaux. D'orientation est-ouest, cette écaïlle se décompose en deux entités. À l'est, le célèbre « Rocher », qui s'avance dans la Méditerranée surplombant le port de Fontvieille et sur lequel est édifié le palais princier ainsi que la vieille ville de Monaco. À l'ouest, l'écaïlle du jardin exotique, qui abrite les grottes de Monaco et au pied de laquelle se situe le projet d'implantation du tunnel T33.

Cette écaïlle, constituée pour l'essentiel par des terrains calcaires d'âge Jurassique chevauche en partie basale des terrains de couverture marneux du Crétacé. Le Jurassique se présente ici sous forme d'un banc cal-

Photo 1

Le chantier dans son environnement  
*The project in its environment*

Monaco. Le tunnel T33



© Emmanuel Gaffard

Photo 2

Tête amont, intersection entre la galerie technique et le tunnel T33

*Upstream portal, intersection between the main services duct and the T33 tunnel*



Photo 3

Fraisage du front avant microminage des bancs rocheux prédécoupés par forages sécants

*Milling of the tunnel face before micromining of the rock benches pre-cut by secant drilling*



caire massif de couleur blanc beige, plus ou moins dolomitisé, puissant de 400 à 500 m; la majeure partie du tunnel a été excavée dans ces terrains. Ce matériau présente de bonnes qualités géotechniques avec une densité de l'ordre de 2,7/2,8 et une résistance à la compression pouvant atteindre les 100 MPa. C'est une roche classée comme très abrasive. On relève une densité de fracturation RQD de 100 % pour des terrains dont la classification oscille entre bon rocher et très bon rocher d'après la classification de Bieniawski, sur la majeure partie du tracé. La caractéristique principale de ce calcaire est la présence de couloirs de dissolution karstique qui peuvent induire la présence de cavités et dans une moindre mesure, de failles plus ou moins ouvertes remplies de concrétions calcaires, cas rencontré sur le T33, ou par des argiles de décarbonatation. Les phénomènes successifs, liés à l'oroge-

nèse alpine dans cette région, qui ont conduit à la mise en place de cette unité, ont induit un régime de fracturation très complexe. Ceci s'est traduit lors de la phase d'excavation par une succession de décrochements, failles inverses et des écaillages en galerie. Bien que ces terrains calcaires soient considérés comme perméables en grand par leur réseau de fractures et de karsts qui s'y est développé, aucune venue d'eau n'a été rencontrée lors du percement.

Les têtes de tunnel présentent quant à elles une géologie moins homogène. La tête amont se divise sur les premiers mètres en deux parties distinctes. Une première zone côté falaise constituée de calcaire massif du Jurassique et une seconde zone occupée par de la brèche de pente, terrains formés d'une matrice argileuse rouge indurée englobant des éléments calcaires de taille décimétrique.

La tête aval constitue le point le plus délicat du projet en raison de l'hétérogénéité du site. Située en pied de falaise, cette zone est formée de terrains quaternaires constitués par un amoncellement de blocs éboulés de grande taille (éboulis mégalithiques) et de brèche de pente. Les cavités situées entre les blocs sont comblées par des poches de sable et de galets, dépôts marins littoraux, témoins d'une paléo plage du temps où la Méditerranée bordait le pied de la falaise. Le tout est surmonté par des éboulis et des remblais anthropiques anciens.

L'attaque du tunnel a été réalisée dans ce contexte géologique complexe alliant hétérogénéité des terrains et faible épaisseur de couverture, ce qui a nécessité la mise en place d'un soutènement spécifique sous la forme d'une voûte parapluie et l'installation de cintres lourds en profilés HEB 220.

■ **Le respect des environnants par la maîtrise des déplacements des soutènements et la limitation des vibrations**

Pour excaver un rocher aussi bon en minimisant l'impact sur les avoisinants, toujours très sensibles à Monaco, un grand nombre de mesures ont été prises. Le réseau mis en place comprend 60 cibles d'auscultation topographique, trois fissuromètres électroniques, dix-huit jauges « Saignac » et vingt-cinq capteurs de vibration géophones reliés au réseau GSM permettant de transmettre les enregistrements de données immédiatement par courrier électronique.

Il faut ajouter à cela le suivi propre de l'ouvrage. Dans la galerie technique et les fouilles des têtes, une vingtaine de butons ont été instrumentés au fur et à mesure de l'avancement en utilisant des capteurs pressiométriques à

Photo 4

Le Robofore utilisé pour le creusement depuis la tête aval  
*The Robofore used for tunnel driving from the downstream portal*

manomètre. Dans les parties les plus sensibles, vingt-sept tirants ont également été équipés à l'aide de cellules électriques de mesure de tension. Dans le tunnel, un suivi des convergences et des tassements a été mis en place, notamment au niveau des têtes chargées de manière dissymétrique. L'ensemble a permis de suivre les réactions des ouvrages au cours des différentes phases de travaux (photo 2).

Le creusement du tunnel a débuté début 2007 par l'attaque amont qui s'est avérée être la plus délicate. En effet, l'axe du futur tunnel attaque de biais la falaise rocheuse immédiatement à l'aplomb de la tête du tunnel montant (T7) et de ses locaux techniques. Dans cette partie de l'ouvrage, l'équipe du chantier a utilisé une technique novatrice de prédécoupage du tunnel par forages sécants permettant de désolidariser la section à abattre du massif environnant, suivi d'un fraisage de roche combiné à de la fissuration par micro-minage (charges variant de 50 à 125 g) (photo 3).

Le matériel spécifique qui a été utilisé est le suivant :

- un Robofore 3 bras modifié spécialement afin d'être équipé sur deux de ses bras d'un couple de glissières avec tous leurs équipements de forage (marteaux, barres, taillants, etc.). La raison de ce montage spécifique réside dans le fait que le seul moyen de forer deux trous parallèles et extrêmement proches l'un de l'autre est de les forer en même temps à partir du même équipement (photo 4);
- une fraise de 200 kW (Erkat) équipée d'outils spécifiques « roche dure »; le tout monté sur une pelle Liebherr 954.

Pour le creusement depuis la tête aval, une fois quittée la zone d'éboulis mégalithiques, une technique hybride combinant le fraisage et le minage de la roche a été mise en place. Lors de l'utilisation du minage comme méthode de creusement, la réalisation du « bouchon », qui est la zone de dégagement primaire, est ce qui produit le plus de nuisances (vibrations, bruit, et projections de fragments de roche). La première des dispositions a été de concevoir ce bouchon par fraisage, en utilisant la fraise mobilisée sur le chantier. Cette technique de creusement permet de produire un niveau de vibration extrêmement faible, voire nul. Un plan de tir a ensuite été bâti avec comme contrainte le respect d'une charge instantanée très faible (625 g à 750 g). Cela implique un maillage serré (70 cm), un nombre de trous de mines important (141 trous pour 55 m<sup>2</sup>), et une utilisation de toute la plage des détonateurs électriques « retard » sur les 10 lignes d'un exploseur séquentiel. Les zones de passage à proximité d'ouvrages sensibles ont été traversées en fraisant une demi-section complète et en minant le banc rocheux restant. Cette méthode hybride permet d'adapter le niveau des vibrations transmises au massif environnant en augmentant la part de section fraisée (photos 5 et 6).



© Emmanuel Gaiffard



Photo 5

Une volée prête à être chargée avec ses 141 trous forés et son « bouchon fraisé »  
*A round ready to be charged, with 141 drillholes and its "milled cap"*

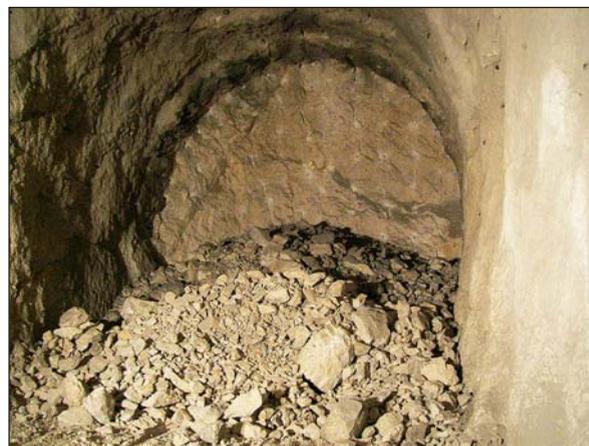


Photo 6

Le résultat d'un tir de mines en pleine section juste après évacuation des gaz et poussières  
*The result of a blast in the centre of the cross section just after removal of the gases and dust*

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### **Maîtrise d'ouvrage**

Service des Travaux Publics de Monaco

##### **Maîtrise d'œuvre**

Coyne-et-Bellier

##### **Bureau de contrôle**

Socotec

##### **Groupement d'entreprises**

Richelmi (mandataire) - Solétanche SAM - Sivia'm



## Monaco. Le tunnel T33

### ► ■ Conclusion

Le tunnel est maintenant excavé; le percement a eu lieu le 8 novembre 2007. Aucun désordre n'est à signaler : les grottes du jardin exotique et une conduite principale d'alimentation en eau de Monaco en fonte grise qui étaient situées à quelques mètres du tunnel n'ont subi aucun dommage. Il reste maintenant à réaliser le revêtement béton du nouveau tunnel pour livrer dans quelques mois cet ouvrage. ■

### ABSTRACT *T33 Tunnel in Monaco*

*J. Cornier, C. Chaubert*

*The T33 job in Monaco is a part of the urbanisation project of the old SNCF railway line and sidings.*

*It consists of a 150 m long road tunnel in rock with an excavated section between 55 and 85 m<sup>2</sup>.*

*The digging methods used have allowed us to reduce the vibration impact on the surrounding neighbourhood.*

### RESUMEN ESPAÑOL *Túnel T33 en Monaco*

*J. Cornier, C. Chaubert*

*La obra T33 a Mónaco forma parte del proyecto de urbanización de los antiguos terrenos de la SNCF.*

*Se trata de un túnel de carretera en roca de 150 m de longitud y de 55 a 85 m<sup>2</sup> de sección excavada.*

*Los métodos de excavación utilizados nos permitieron reducir el impacto de las vibraciones en las obras muy sensibles situadas a proximidad.*

# Le tunnel de Chavanne : maillon clef de la LGV Rhin-Rhône

**Patrick Berland**  
Directeur des Travaux  
Spie batignolles

**Les travaux de percement du tunnel de Chavanne, situés dans une géologie tourmentée, et les impératifs de planning serrés, incluant douze délais partiels, ont nécessité la mise en œuvre d'une double attaque combinant explosifs « pompables » et abattage mécanisé.**

Relier la province à... la province. C'est effectivement ainsi que pourrait se résumer l'intérêt de l'étoile ferroviaire à grande vitesse Rhin-Rhône composée de trois branches : la liaison Dijon - Mulhouse à l'est en cours de construction, la traversée de la Côte-d'Or à l'ouest, et vers le sud la jonction avec Lyon dont les modalités restent à établir.

Dès 2012, la mise en service de la branche Est permettra de désenclaver le nord-est de l'Hexagone en reliant Dijon à Strasbourg en 2h10, contre 3h40 actuellement, et Belfort-Montbéliard à Dijon en 0h50 (2h15 aujourd'hui) avec des rames roulant à 320 km/h en moyenne dans les premiers temps (puis 350 km/h au cours des années suivantes). Dans la pratique les travaux en cours concernent 140 km de ligne nouvelle.

À terme ce projet de 2,312 milliards d'euros, qui a reçu l'appui financier de la Suisse et retenu par l'Union européenne comme « liaison prioritaire », rapprochera la France des espaces éco-démographiques majeurs du bassin rhénan et du Benelux, tout en facilitant leurs liaisons avec les pôles économiques et urbains de la Méditerranée.

## ■ Une géologie tourmentée

Les 6,320 km du TOARC C1<sup>1</sup> s'étendent sur les deux départements du Doubs et de la Haute-Saône, l'ensemble des travaux (cf. encadré « Les principaux ouvrages du TOARC C1 ») ayant été regroupé, à la demande du maître d'ouvrage, en un lot commun alors que celui-ci était initialement divisé en cinq.

L'ordre de service a été notifié le 18 octobre 2006. Le délai contractuel global de 34 mois, qui comprenait 3 mois de préparation, intègre par ailleurs 12 délais partiels, le pont-route, qui permet de dévier la RD 129 pour accéder à la commune de Chavanne, ayant déjà été réceptionné dès la fin septembre 2007.

1. Terrassement ouvrages d'art réseaux et rétablissement des voies de communication.

2. Direction régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement.

3. Mission inter service de l'eau.

Dans la zone de franchissement de la RD 96 constituée de terrains humides fortement compressibles, des remblais de « préchargement » ont dû être réalisés, alors que le cours d'eau de la Sapoie a été dévié parallèlement à l'ancienne route.

À noter que les préoccupations environnementales très fortes, auxquelles obéit l'ensemble du projet, ont nécessité l'obtention d'autorisations de la Drire<sup>2</sup> et de la Mise<sup>3</sup> avant toute intervention dans les milieux sensibles, notamment dans les zones humides qui abritent certaines espèces de batraciens remarquables.

Afin de minimiser les problèmes de nuisances sonores occasionnés aux riverains et dues à la circulation des engins, une piste spéciale de 6 km de long (pente 13 %) a été aménagée afin de relier les deux têtes du tunnel de Chavanne, élément clef du chantier et seul ouvrage de ce type sur l'ensemble de la branche est. Dans la pratique, les deux extrémités de l'ouvrage sont constituées d'une section en faux tunnel - 190 m à l'ouest et 50 m à l'est - le creusement des 1730 m de la partie souterraine (section excavée de 120 à 140 m<sup>2</sup>

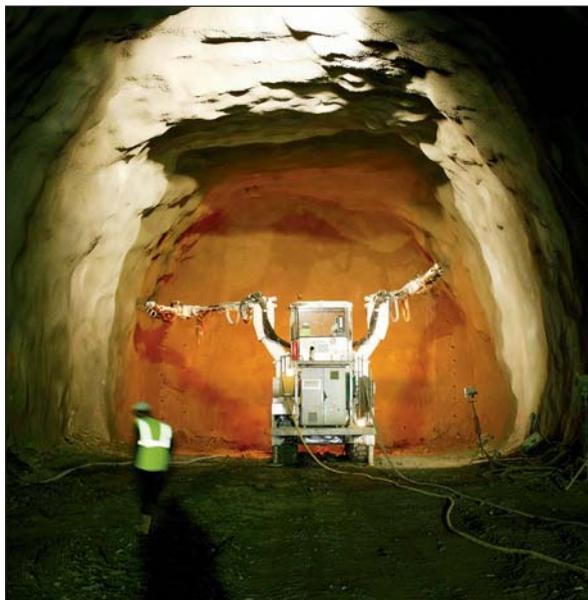


Photo 1

Le percement s'effectue par l'intermédiaire d'un jumbo automatique Robodrill trois bras

*Drilling is performed by means of a Robodrill automatic three-armed jumbo*

## LES PRINCIPAUX OUVRAGES DU TOARC C1

- Tunnel de Chavanne (longueur totale 1970 m)
- Tranchée couverte d'Aibre-Trémoins (longueur 170 m)
- Cinq ouvrages d'art courants (deux ponts-rails et trois ponts-routes)
- Huit rétablissements de communication
- Écrans acoustiques
- Déviation du cours d'eau de la Sapoie

## Le tunnel de Chavanne : maillon clef de la LGV Rhin-Rhône



Photo 2

Un second Robodrill est prévu sur la tête ouest, au cas où les conditions géologiques pourraient justifier le recours à la technique par explosif

*A second Robodrill is planned on the western portal, if geological conditions justified use of explosive techniques*



pour une section utile de 80 m<sup>2</sup>) se déroulant dans une géologie assez chahutée avec dominante calcaire à l'est et prédominance des marnes à l'ouest.

Les contraintes de délais serrés, avec un objectif de percement fixé en janvier 2009 au PM 900, ont conduit au choix d'une attaque double, les travaux de creusement ayant démarré début juin, côté est, chacune des deux têtes étant totalement autonome et indépendante.

### FICHE TECHNIQUE

**Maître d'ouvrage**

Réseau Ferré de France

**Maître d'œuvre**

Setec

**Génie civil**

Groupe Spie batignolles TPCI (mandataire) - Chantiers Modernes - Campenon Bernard TP - GTM Génie civil et Services

**Terrassements**

Groupe Deschiron - Valérian - GTM Terrassements

**Chaussées**

Groupe Eurovia - Bonnefoy - Sacer

**Délai contractuel**

34 mois



Photo 3

Côté ouest, le creusement se déroule dans un horizon de marnes altérées nécessitant l'emploi d'outils d'abattage ponctuel

*On the western side, tunnel driving is carried out in a horizon of weathered marls occasionally requiring the use of cutting tools*

### ■ Explosifs « pompables » Tête Est

Après une dizaine de mètres réalisés en traditionnel sous confortement, à l'abri d'une voûte parapluie et de profils cintrés, la progression s'est ensuite poursuivie à l'explosif moyennant des volées qui atteignent 5 m aujourd'hui, contre 3 à 4 m dans les premières semaines : le plan de tir variable, exécuté par l'intermédiaire d'un jumbo automatique Robodrill 3 bras, nécessitant une moyenne de 155 forages.

L'utilisation d'une émulsion de type « pompable » (charge instantanée d'environ 12 kg), combinée à une technique d'amorçage non électrique, garantit des conditions de sécurité maximales, les chocs éventuels sur les tubes ou les problèmes de venues d'eau au niveau des épissures n'induisant aucun risque de déclenchement intempestif.

Le soutènement à l'avancement est assuré au moyen de boulons (type Swellex) et d'une couche de béton projeté fibré variable de 15 cm à 30 cm d'épaisseur réalisée en trois passes, la dernière de 3 cm d'épaisseur ne contenant pas de fibres afin de ne pas induire le moindre risque de blessure sur la future étanchéité. La présence d'une faille repérée et identifiée, située au niveau du passage du col, nécessitera la réalisation de carottages à l'avancement afin de reconnaître la géologie précise et identifier la lithologie exacte du terrain rencontré. Une fois franchie cette zone particulière, les travaux devraient se poursuivre dans un calcaire compact jusqu'au point de jonction.



Photo 4

Le radier, dont l'épaisseur varie de 0,85 m à 1,40 m (C35/45) sera exécuté en deux étapes, 150 m à l'arrière du front de taille, afin d'autoriser la circulation des engins

*The foundation raft, of thickness ranging between 0,85 m and 1,40 m (C35/45), will be executed in two stages, 150 m back from the tunnel face, to permit the movement of machinery*

Au front de taille l'utilisation d'une machine Italmec, équipée d'un bras central érecteur et deux bras latéraux supportant chacun une nacelle indépendante, permet la mise en place du cintre et le chargement de la volée. Côté ouest, le creusement se déroule essentiellement dans un horizon de marnes altérées comportant de nombreux plans de fracturation, d'où la nécessité d'opérer au moyen d'outils d'abattage mécaniques de type fraise ou BRH, monté sur une pelle Komatsu PC450 équipée d'un balancier rallongé.

0,85 m à 1,40 m (C35/45) sera donc exécuté en deux étapes, afin d'autoriser la circulation des engins, la voûte – trois types d'épaisseur de 0,45, 0,55 et 0,60 m – construite à 200 m en retrait du front de taille, étant quant à elle réalisée par l'intermédiaire d'un coffrage métallique autobloquant de 10 m de longueur, doté d'un système de vibration électrique.

Côté environnemental, le projet intègre une campagne de contrôle au niveau des nuisances sonores, les habitations situées à proximité de chaque tête étant

## ■ Revêtement à l'avancement

Le tracé, qui traversera une section de marnes noires devrait également franchir une faille de schistes cartons, une géologie difficile qui nécessite la mise en œuvre de soutènements lourds (HEB 220) avec réalisation d'une contre-voûte sous voûte parapluie de 15 m de longueur (6 m de recouvrement) à coque boulonnée en béton projeté pouvant atteindre 30 cm d'épaisseur.

La voûte parapluie est exécutée directement avec le jumbo de foration Robodrill qui travaille en outil perdu, les forages étant équipés au fur et à mesure du creusement. Particularité : les marnes étant fortement sensibles à la présence d'eau, le forage s'effectue sous adjonction d'un polymère qui facilite l'évacuation des « cutting » tout en évitant l'infiltration d'eau dans le terrain.

L'ensemble des travaux d'excavation, qui représente un volume de déblais de 224 000 m<sup>3</sup>, se déroule concomitamment avec la réalisation du revêtement définitif. À noter que la solution initiale, qui prévoyait la mise en place d'un pont de transfert à l'arrière de chacun des fronts de taille, devrait être abandonnée au profit d'une construction par demi-largeur du radier, une option qui permettra de diminuer la pénibilité des conditions de travail sur les différents ateliers amonts. Dans la pratique le radier, dont l'épaisseur varie de



Photo 5

L'ouvrage souterrain de 1730 m comporte deux parties de 190 m à l'ouest et 50 m à l'est, en faux tunnel

*The 1730-metre underground structure includes two parts 190 m to the west and 50 m to the east, in portal form*

## Le tunnel de Chavanne : maillon clef de la LGV Rhin-Rhône



Photo 6

La voûte, construite 200 m en retrait du front de taille, est réalisée par l'intermédiaire d'un coffrage métallique autobloquant de 10 m de longueur, doté d'un système de vibration électrique

*The arch, built 200 m back from the tunnel face, is executed by means of self-locking steel formwork 10 metres long, provided with an electrical vibrating system*

▶ équipées de sonomètres permettant d'effectuer des mesures en continu avec édition de rapports mensuels. Au niveau sécurité, les deux sections de tunnel abritent un système qui affiche les valeurs instantanées de chacun des gaz présents dans les galeries après le tir, l'enregistrement de ces valeurs permettant d'étudier la nature et la propagation de ces différents composants. Signalons enfin que les travaux, qui représentent un volume total de déblais d'environ 2 millions de mètres cubes, génèrent un mouvement de terre fortement excédentaire avec une capacité de dépôt limitée. ■

### ABSTRACT

*The Chavanne tunnel : a key link on the Rhine-Rhone high-speed train line*

P. Berland

*The Chavanne tunnel drilling work is performed in the Doubs and Haute-Saône "départements".*

*In this location with a hostile geology, together with drastic time constraints, the use of pumpable explosives had to be considered, combined with mechanised cutting.*

*These works form an integral part of the construction project for the future Rhine-Rhone high speed railway line.*

*Costing a total of 2.312 billion euros, this line will bring France closer to the populations and economies of the Rhine Basin and the Benelux.*

### RESUMEN ESPAÑOL

*El túnel de Chavanne : eslabón principal de la línea de alta velocidad Rin-Ródano*

P. Berland

*Los trabajos de excavación del túnel de Chavanne se efectúan en los departamentos del Doubs y de la Haute-Saône.*

*En este lugar de geología difícil, combinada con imperativos de tiempo drásticos, se ha debido contemplar el empleo de explosivos «bombeables» duplicado por una perforación mecanizada.*

*Esta obra forma parte integrante del proyecto de construcción de la futura línea ferroviaria de alta velocidad Rin-Ródano.*

*De un importe total de 2.312 millones de euros, esta línea permitirá acercar a Francia de las zonas eco-demográficas de la cuenca renana y del Benelux.*

# Le tunnel des Grands Goulets sur la RD518



**Rachid Kabbaj**  
Chef de service travaux  
Bouygues TP

**Mai 2005 - Décembre 2007: Bouygues TP réalise le tunnel des Grands Goulets pour le compte du Conseil général de la Drôme dans le cadre de travaux de sécurisation de la route des Grands Goulets. Cette route sujette à des chutes de blocs et des éboulements a été taillée à flanc de falaise il y a plus de cent cinquante ans. Cet axe vital relie le plateau du Vercors à la vallée de l'Isère en empruntant la vallée de la Vernaison, un site environnemental très sensible. Le tunnel des Grands Goulets est l'occasion pour les équipes de Bouygues TP de mettre en œuvre, pour la première fois en France, de nombreuses techniques dans des domaines aussi divers que l'explosif en émulsion, l'emploi de fibres synthétiques dans le béton projeté, et l'utilisation d'un coffrage tunnel marchant. C'est aussi un chantier délicat qui doit prendre en compte de nombreuses spécificités environnementales, stabilité de la falaise, préservation de la faune et de la flore, sans oublier la prise en compte des attentes de la population à la fois en termes d'emploi mais aussi de respect de son cadre de vie.**

Le projet du tunnel des Grands Goulets s'inscrit dans le cadre d'un projet de sécurisation de la très célèbre route du même nom. Cet itinéraire relie, au nord du département de la Drôme, la vallée de l'Isère et la région du Royans au plateau du Vercors.

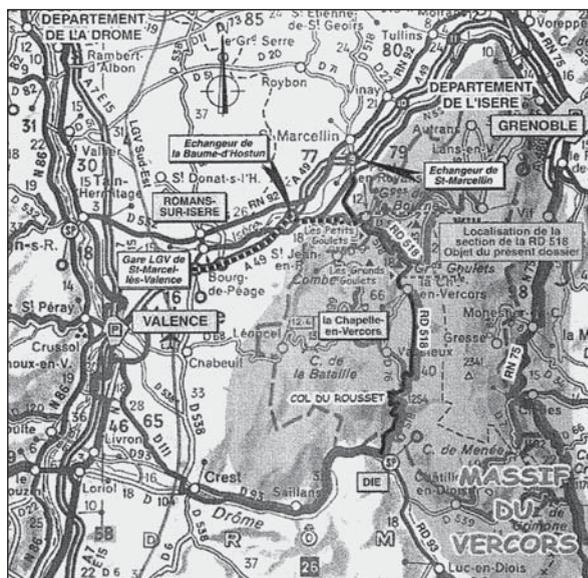
La route des Grands Goulets a été édifiée à flanc de falaise il y a déjà 150 ans. Cette falaise calcaire haute de plus de cent mètres est sujette à des chutes de blocs quotidiennes mais aussi à des éboulements de plusieurs centaines de mètres cubes. Ces éboulements entraînent systématiquement la fermeture pour plusieurs mois de la route départementale entre Barraques-en-vercors et Echevis. D'importants travaux de confortement et de sécurisation de la falaise sont réalisés tous les ans pour maintenir en service cet accès vital au développement du plateau.

Voilà, pourquoi la réalisation d'un tunnel long de 1683 m qui était attendu depuis des décennies par la population a été votée à l'unanimité par le département de la Drôme.

Le service technique départemental de la Drôme assure la maîtrise d'ouvrage et la gestion globale de l'opération. La surveillance du chantier et la maîtrise d'œuvre ont été confiées à la société Egis Tunnels par le Conseil général de la Drôme.

Le 3 mai 2005, Bouygues Travaux Publics a reçu l'ordre de service de début des travaux. Les travaux du tunnel, creusement et revêtement mais aussi, VRD, chaussée, peinture des piédroits et ouvrages extérieurs, doivent être réalisés dans un délai de 32 mois.

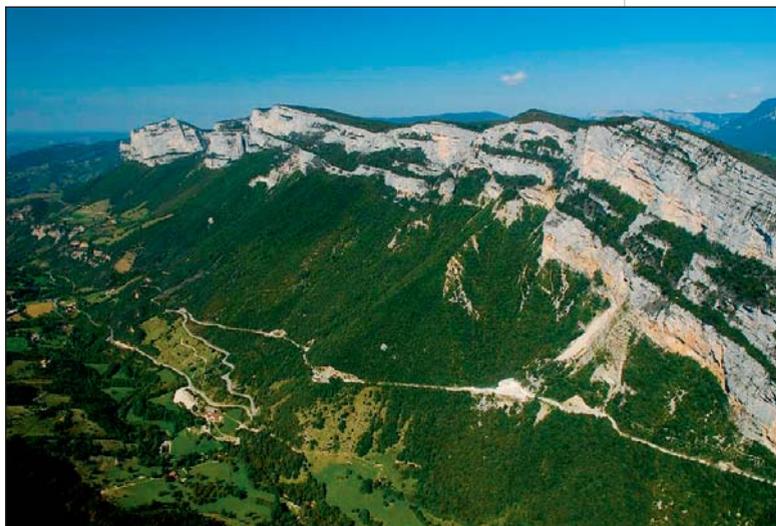
Rappelons enfin, que l'ouvrage se situe dans le parc régional du Vercors. Les contraintes d'exécution liées à l'environnement sont particulièrement fortes. Véritable joyau touristique, le site classé des Grands Goulets abrite, en effet, une faune et une flore sensibles et remarquables (figure 1 et photo 1).



**Figure 1**  
Carte de la région  
et localisation du tunnel  
Map of the region  
and tunnel location

**Photo 1**

La RD 518 sinuant dans la vallée  
County road RD 518 winding through the valley



## Le tunnel des Grands Goulets sur la RD 518

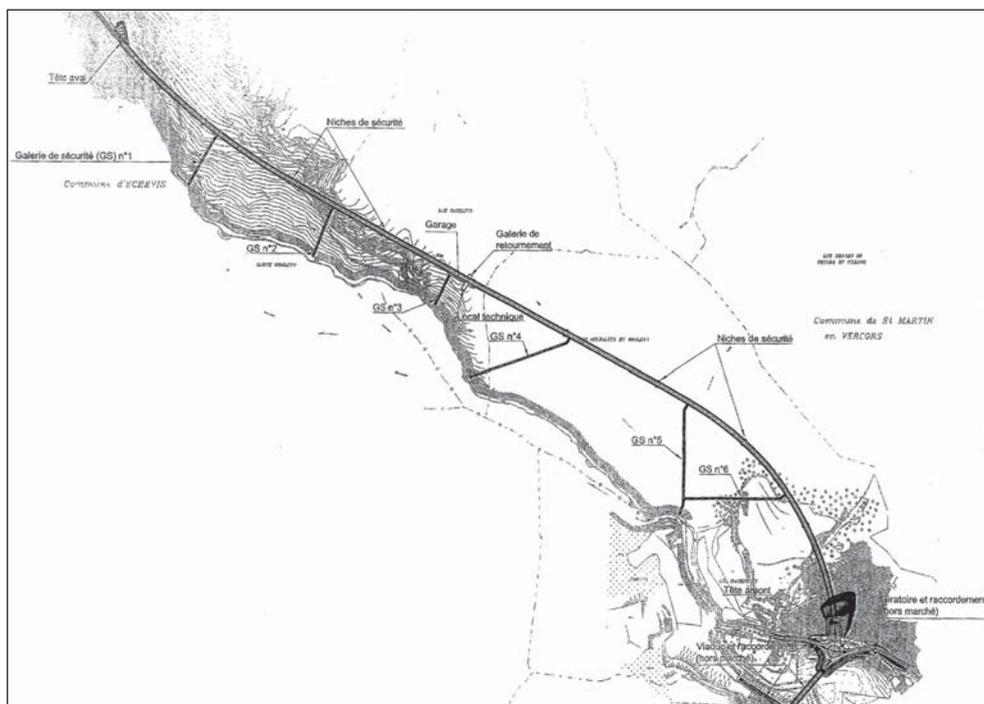


Figure 2  
Tracé détaillé  
du tunnel  
Detailed tunnel  
alignment

### ■ L'ouvrage

Le marché de travaux génie civil se décompose en plusieurs lots comprenant : le tunnel, les têtes et les autres travaux.

#### Le tunnel

L'ouvrage est un tunnel monotube long de 1 650 m offrant une chaussée de 7 m de large. Il est excavé dans des calcaires rocheux sur 1 500 m en attaque montante et dans des sables grésifiés sur 150 m en attaque descendante. Le tunnel présente une section courante excavée de 70 m<sup>2</sup> et une pente constante de 4,71 % sur toute sa longueur.

Pour répondre à la circulaire sur la sécurité 2000-63 :

- le tunnel est équipé de six galeries de sécurité de 15 m<sup>2</sup> de section. Ces galeries sont espacées tous les 250 m. Elles totalisent une longueur totale de 850 m excavés dans les calcaires. Les longueurs des galeries varient entre 50 m pour la plus courte et 210 m pour la plus longue. Toutes disposent d'un sas de 10 m de long côté tunnel. Elles se raccordent à l'ancienne route des Grands Goulets grâce à une ouverture volontairement discrète, qui n'autorise que le passage des piétons ;
- à 700 m de l'entrée aval, le tunnel s'élargit de 3 m sur une longueur de 56 m, portant la section excavée à 110 m<sup>2</sup>. Au droit de ce tronçon, est excavée perpendiculairement à l'axe du tunnel, une aire de retournement (qui permet à un poids lourd de faire demi-tour en cas d'incident) et un local technique ;
- des niches de sécurité sont positionnées tous les 250 m (figure 2).

### Les têtes

La conception architecturale des têtes de tunnel a été confiée par le maître d'ouvrage au groupement Jacques Dolveck, paysagiste, et Christophe Céron, Charles Lavigne, architectes. Les ouvrages de la tête amont sur le hameau de Barraques-en-Vercors se composent de la tête de tunnel architecturale intégrant un local technique et un local pompier, d'un bassin de rétention des eaux et d'un bassin réservoir incendie doté d'une capacité de stockage de 120 m<sup>3</sup> d'eau, minimum nécessaire disponible en cas d'incendie en tunnel pendant la première heure d'intervention.

Les ouvrages de la tête aval sur la commune d'Echevis se composent d'un ouvrage architectural qui vient souligner une entrée en tunnel tangente à la falaise calcaire et d'un bassin de rétention enterré sous la route départementale dont la vocation est de contenir toute pollution des eaux à l'intérieur de l'ouvrage.

### Les autres travaux

La chaussée souple est composée d'une couche de grave naturelle comprise entre 10 cm et 20 cm, d'une couche de grave traitée de 10 cm d'épaisseur et de 6 cm d'enrobés. Les VRD représentent plusieurs dizaines de kilomètres de conduites et fourreaux de tous types et de toutes natures (conduite incendie fonte, conduite d'évacuation des eaux en PVC, passages de câbles, etc.). Enfin, la peinture qui parachève les parements sur une hauteur de 4 m au-dessus des trottoirs (figure 3).

### ■ L'environnement des travaux

Le projet de réalisation du tunnel des Grands Goulets vient s'inscrire au cœur d'une concentration de contraintes liées à l'environnement. En effet, le site des Grands Goulets se trouve dans un cadre environnemental particulièrement sensible :

- parc naturel régional du Vercors ;
- sites inscrits « Le Pavillon et les Barraques-en-Vercors » ;
- ZNIEFF de type 1 « cours moyen de la Vernaison », présence de pisciculture ;
- espace naturel sensible du département de la Drôme « Les Goulets » ;
- site Natura 2000 « sources et habitats rocheux de la Vernaison et des Goulets » ;
- les habitations de Barraques-en-Vercors à proximité desquelles s'inscrit la tête amont du projet.

La RD 518, très touristique à hauteur du site des Grands Goulets, ne devait rester fermée, à l'origine, que sur une période comprise entre le 1<sup>er</sup> septembre 2005 et le 1<sup>er</sup> juillet 2007.

Cet ensemble de contraintes va fortement influencer sur le choix des installations de chantier au droit des deux têtes aval et amont (photos 2 à 4).

### ■ Installations de chantier - Tête aval et tête amont

Les installations de chantier et les travaux de terrassements de la tête aval ont débuté le 5 juillet 2005. L'entreprise, en concertation avec les services de la DDE et le maître d'œuvre, parvient à éviter la mise en place d'un alternat sur le tronçon de la RD 518 en maintenant au droit de la tête aval une largeur de passage de 5 m, évitant ainsi, pour la saison touristique de l'été 2005, d'entraver la circulation des riverains et des touristes, nombreux à cette période.

Le 5 septembre 2005, la RD 518 est fermée provisoirement à la circulation. Compte tenu de la forte sensibilité à l'environnement du site l'entreprise choisit :

- d'installer ses bureaux dans l'hôtel *Le Refuge* situé à 2 km de la tête aval sur la RD 518;
- d'organiser le transport de son personnel depuis le village de Sainte-Eulalie et le chantier;
- d'installer des feux tricolores de part et d'autre des Petits Goulets pour limiter les risques d'accidents de circulation au droit de ce tronçon très étroit de la RD 518;
- d'utiliser les capacités de production béton des centrales de réseaux dont la plus proche est située sur la commune d'Auberives-en-Royans à 17 km, ou 30 minutes du chantier, les deux autres étant les centrales de Saint-Marcellin et de Villars-de-Lans;
- d'employer un explosif pompable évitant la mise en œuvre d'un stockage d'explosif lourd et le transport quotidien d'environ 2 t d'explosif sur des routes de montagne traversant de nombreux villages.;
- de réutiliser pour les remblais et les modelages des matériaux produits par l'excavation;
- de réutiliser, pour réaliser la première sous-couche de grave non traitée, des produits de l'excavation du tunnel préalablement concassés;
- d'aménager une station de traitement des eaux (MES et PH) capable de traiter un débit de 40 m<sup>3</sup>/h;
- de mettre en place des bacs de lavage des goulottes des camions toupies;
- d'installer une ligne de 20000 volts longue de 2 km dans les Grands Goulets pour alimenter en énergie la tête amont depuis le transformateur installé tête aval et éviter l'utilisation de groupe électrogène;
- de poser une conduite d'eau calorifugée longue de 2 km pour récupérer l'eau puisée aux Barraques-en-Vercors et l'amener par gravité jusqu'à la tête aval d'où elle est renvoyée dans le tunnel.

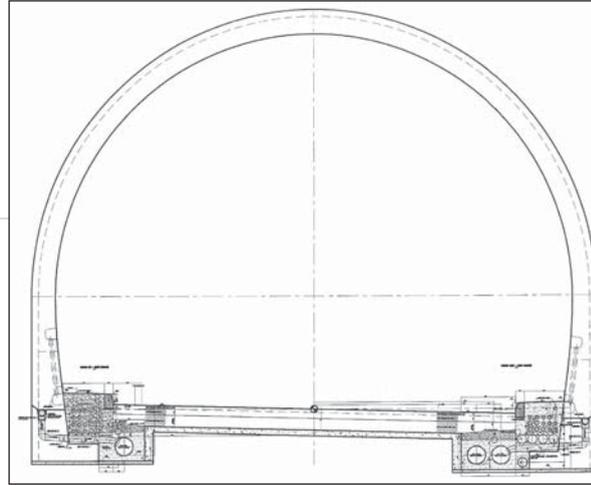


Figure 3  
Coupe type du tunnel  
Typical cross section  
of the tunnel



Photo 2  
Éboulement sur le RD 518 aux Barraques-en-Vercors  
Rock slide on RD 518 at Barraques-en-Vercors



Photo 3  
La Vernaison dans les Grands Goulets  
La Vernaison in the Grands Goulets

La fermeture de la RD 518 devient définitive après un éboulement de plus de 1200 m<sup>3</sup> de rocher dans la nuit du 13 au 14 décembre 2005. Cet éboulement emporte la route sur une dizaine de mètres et vient rappeler à tous les intervenants la nécessité de réaliser l'ouvrage.

Un dernier facteur important lié à l'environnement a été pris en compte : la population locale. En effet, les équipes travaux de Bouygues Travaux Publics se sont fortement mobilisées aux côtés du département de la Drôme et des élus du Vercors et du Royans pour que la population soit associée aux travaux du tunnel des Grands Goulets, le plus grand chantier de travaux publics du département.

Photo 4  
Les chutes de cailloux sur la RD 518  
Stone falls on county road RD 518

## Le tunnel des Grands Goulets sur la RD 518

Photo 5

Installations de chantier aval -  
Ateliers

*Downstream construction  
plant - Equipment*



Photo 6

Traitement des eaux tête aval

*Downstream portal water  
treatment*



Le chantier aura ainsi fait appel, pour plus de la moitié de ses effectifs, à des personnes originaires de la région. De nombreuses journées portes ouvertes et autres visites de scolaires et d'associations ont été organisées en association avec le Conseil général.

Par ailleurs, l'itinéraire de transhumance par les Grands Goulets restera ouvert aux troupeaux malgré les travaux (photos 5 et 6).

### ■ L'excavation du tunnel des Grands Goulets

#### La géologie

Le projet du tunnel des Grands Goulets vient s'inscrire dans un horizon géologique appartenant au Crétacé inférieur et supérieur.

Différentes natures de terrain depuis l'aval vers l'amont se succèdent ainsi :

- l'entrée aval vient s'inscrire dans un éboulis masquant totalement la falaise rocheuse en cet endroit, détail qui va conduire l'entreprise à définir au fur et à mesure des travaux d'excavation l'ensemble des méthodes de réalisation de l'ouvrage d'entrée aval;

- la première nature géologique rencontrée ensuite sont les barrémiens qui se caractérisent généralement par des calcaires compacts pour partie altérés par des karsts.

- la seconde nature géologique correspond aux calcaires blancs massifs coralliens.

Vient ensuite une succession stratigraphique plus complexe et hétérogène – Bédoulien Aptien et Albien (sables) – très fortement altérés par la présence de karsts actifs et passifs que l'excavation va mettre au jour.

La qualité des roches va déterminer les deux méthodes d'excavation mises en œuvre sur ce projet.

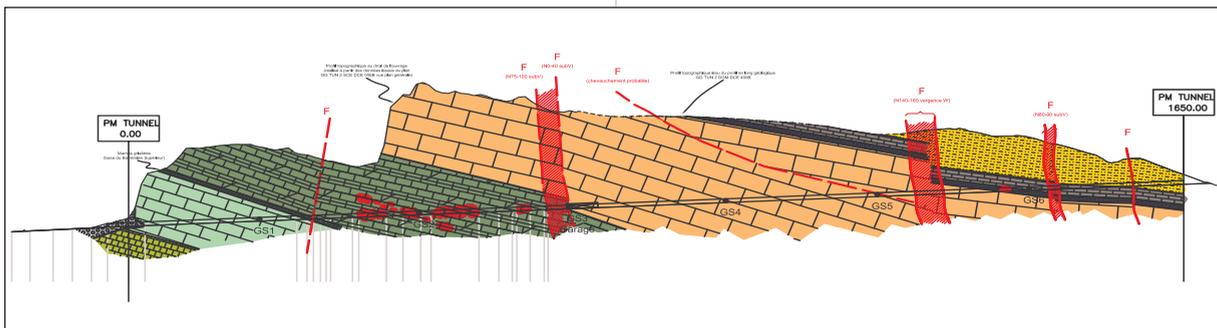
Entre les points métriques 0 et 1500, le tunnel est excavé à l'explosif depuis la tête aval en attaque montante afin de permettre l'écoulement des eaux d'exhaure vers l'aval et la station de traitement. La foration est réalisée avec un robot trois bras automatiques type Robodrill et l'explosif utilisé est une émulsion pompable développée par Nitro-Bickford.

Le marinage est assuré par DTP Terrassement à l'aide d'un chargeur à godet à déversement latéral et d'une flotte de sept tombereaux automoteurs. Le soutènement se compose de boulons à friction longs de 4 m associés à une épaisseur de béton projeté fibré de 7 ou 12 cm selon les profils, mis en œuvre avec un robot Normet. Une nacelle Normet électrique, équipée de deux bras est utilisée pour poser les boulons à friction qui constituent l'essentiel du soutènement dans les zones de bonne tenue. Dans les zones délicates, le soutènement est réalisé avec des cintres en HEB 180 remplis de béton projeté non fibré. Dix tirs sont réalisés par semaine conduisant à des avancements de plus de 45 m par semaine.

Entre les points métriques 1650 et 1550, le tunnel est excavé depuis la tête amont avec une machine à attaque ponctuelle d'une puissance égale à 200 kW. Les travaux ont débuté en septembre 2005 avec l'objectif de sortir du chemin critique l'excavation de ce tronçon.

L'attaque se fait en descendant en deux phases. Dans un premier temps, réalisation de la demi-section supérieure à l'abri d'un soutènement fait de cintres à oreilles en HEB 180 espacés tous les mètres puis tous les 1,5 m. Le vide entre les cintres est rempli d'un béton projeté non fibré. Les sables grésifiés étant très sensibles à l'eau, un radier béton est réalisé à l'avancement.

Une fois la demi-section supérieure excavée et soutenue, le stross est abattu toujours avec la machine à attaque ponctuelle. Les cintres en appui sont repris en sous-œuvre. Enfin, pour fermer la section, sept plots de contre-voûte de 12,5 m de long sont réalisés depuis le front rocheux en remontant vers la tête amont. Dix cintres sont posés par semaine.



**Figure 4**  
 Coupe géologique du tunnel des Grands Goulets avec profil en long  
*Geological cross section of the Grands Goulets tunnel with longitudinal profile*

Entre les points métriques 1550 et 1500, l'excavation depuis la tête amont se poursuit en descendant en demi-section supérieure dans un horizon mixte composé de sables grésifiés compatibles avec l'utilisation de la machine à attaque ponctuelle et de rocher très induré nécessitant l'emploi de l'explosif (figure 4).

### L'excavation des galeries de secours

L'excavation des galeries de secours est exécutée depuis le tunnel pour des raisons de sécurité liées aux chutes de blocs. Les terrains traversés étant calcaires, l'excavation est réalisée à l'explosif à l'identique de l'excavation du tunnel principal. Le système Morse a été dimensionné pour pouvoir circuler dans la galerie. Le soutènement est réalisé par des boulons HA de 2 m de long. Le revêtement est une coque en béton projeté fibré polypropylène.

Les principales dispositions prises sur le chantier pour réaliser ces galeries sont les suivantes :

- la section de la galerie sur les dix premiers mètres est portée de 9 m<sup>2</sup> (surface théorique) à 25 m<sup>2</sup>. Ainsi, en phase de creusement, les entrées des galeries peuvent être utilisées pour le demi-tour des engins de terrassement et des toupies béton;
- la section courante de la galerie de secours qui n'est pas revêtue a été volontairement augmentée de 9 m<sup>2</sup> à 15 m<sup>2</sup> environ. Cela permet d'utiliser un deux bras de foration et de moyens de marinage plus importants, ainsi que l'installation d'une gaine de ventilation de 800 mm de diamètre à une cinquantaine de mètres du front.

Au total, l'excavation du tunnel des Grands Goulets aura produit 150 000 m<sup>3</sup> de matériaux et nécessité la mise en œuvre d'environ 10 000 m<sup>3</sup> de béton projeté.

### ■ L'utilisation de l'explosif aux Grands Goulets

Deux dispositions majeures sont mises en œuvre de manière industrielle par Bouygues TP sur le chantier des Grands Goulets :

- le système Morse;
- le tir séquentiel non électrique.

Ces deux dispositions associées vont améliorer de manière significative la sécurité et la logistique d'emploi de l'explosif en tunnel.

### Le système Morse

En février 2006, pour la première fois en France métropolitaine, le système Morse (Module de repompage et de sensibilisation d'émulsion) développé par le groupe EPC au travers de sa filiale Nitrochimie, est mis en œuvre avec succès. Ce système se compose d'une unité de fabrication d'explosif comprenant :

- une cuve de 980 l pour la matrice agréée pour le transport de matières dangereuses par la route;
- trois réservoirs de 115 l pour le réactif 1, un correcteur d'acidité influençant la vitesse de gazéification, le réactif 2 l'agent gazéifiant et l'eau indispensable à la lubrification des canules et au nettoyage de l'outil après usage;
- quatre pompes dont le fonctionnement est assuré par un groupe hydraulique : une pompe pour la matrice type PCM, et trois autres pompes CAT pour les réactifs et l'eau;
- l'ensemble est géré par un automate de régulation en charge de la production et du chargement de l'explosif;
- enfin, deux canules diamètre 19 mm d'une longueur de 25 m chacune équipées en extrémité d'un mélangeur statique.

Aucune des matières livrées sur le chantier pour être embarquées sur le Morse n'est classée explosif. Le Morse et les produits nécessaires à la fabrication de l'émulsion sont stockés dans un hangar chauffé. L'émulsion a une densité comprise entre 0,9 et 1,2 kg par litre. L'émulsion a une sensibilité 1 000 fois moins sensible aux chocs que la dynamite.

Sur ce chantier, la capacité de production du Morse était égale à 1,2 t avec un débit de fabrication compris entre 30 et 50 kg minutes.

Le principe de fonctionnement du Morse permet de produire de l'explosif uniquement à l'extrémité de la

## Le tunnel des Grands Goulets sur la RD 518

Photo 7

Chargement d'un trou de mine

*Charging a blast hole*



Photo 8

Chargement d'une volée

*Charging a round*



Photo 9

Porteur Morse - Nitro Bickford  
Morse carrier - Nitro Bickford



Photo 10

Robot de foration trois bras Robodrill

*Robodrill 3-arm drilling robot*



canule de pompage qui est introduite dans le trou de mine. C'est le passage du mélange dans le mélangeur statique installé en bout de canule qui va assurer la gazéification et la sensibilisation de l'émulsion par homogénéisation des réactifs chimiques injectés conjointement. Le produit chargé dans le trou est du Nitram TX1. Ce produit ne devient explosif qu'après la fin de la réaction de sensibilisation et de gazéification alors qu'il a été chargé en fond de trou depuis une vingtaine de minutes (photos 7 à 10).

### Le plan de tir séquentiel

Le choix de l'émulsion va conduire le chantier à revoir les plans de tirs habituellement utilisés avec l'explosif encartouché.

La principale différence est que le produit occupe 100 % du volume contrairement à la cartouche. Toute la technique de l'utilisation de l'explosif en émulsion réside dans la bonne répartition d'énergie dans le massif.

Les diamètres de foration utilisés dans le plan de tir sont au nombre de trois :

- 48 mm pour les trous de contours et le bouchon;
- 57 mm pour les trous d'abattage et de radier;
- 127 mm pour les trous centraux vides.

Les longueurs de foration varient entre 1,5 m et 4,9 m en fonction de la qualité du rocher.

Le découpage soigné est réalisé en associant un cordeau détonnant 70 g par mètre, à une charge d'émulsion en fond de trou de 1,5 kg.

La charge spécifique moyenne en section courante oscille entre 2,1 kg et 2,5 kg au mètre cube.

### La séquence de mise à feu et les contrôles de vibration

Le tracé du tunnel évoluant entre 0 m et 200 m de la falaise surplombant la route départementale 518, de fortes contraintes sismiques au regard de la stabilité de la falaise étaient imposées au chantier. L'ensemble des tirs a été enregistré par un minimum de trois capteurs sismiques installés en falaise le long de la route des Grands Goulets.

L'utilisation d'un schéma d'amorçage non électrique (Nonel) a été retenue du fait de la meilleure résistance du tube de Nonel contrairement au fil électrique lors de l'introduction de la canule en fond de trou. L'émulsion étant un produit gras, il était aussi plus facile pour les utilisateurs de manipuler des tubes Nonel que des fils électriques.

Ainsi le détonateur Nonel va permettre de réaliser des tirs séquentiels en limitant à deux le nombre de trous partant dans le même intervalle de temps et à 2 s seulement l'ensemble de la séquence des 107 trous. Aucun dépassement de seuil ne sera enregistré sur ces tirs en pleine section.



Photo 11

Vue du tunnel avec les gaines de ventilation  
View of the tunnel with the ventilation shafts

### Les gaz de tir

Le principal phénomène constaté lors de l'utilisation de l'émulsion explosive est le très fort dégagement d'ammoniac (NH<sub>3</sub>).

Au chargement tout d'abord, parce que la réaction entre le nitrate d'ammonium contenu dans l'émulsion et la chaux contenue dans le béton projeté est immédiate. Aussi, pour limiter efficacement cet effet, le chargement doit être soigné et sans bavures.

Au tir, ensuite, qui produit de l'ammoniac et du monoxyde de carbone.

Pendant le marinage, enfin, lorsque les gaz emprisonnés dans le marin sont libérés au fur et à mesure de l'enlèvement. Les mesures de gaz ont été réalisées dans la cabine de conduite de la chargeuse, le poste de travail le plus exposé.

L'analyse des mesures de gaz enregistrées permet de conclure que pour limiter efficacement le risque « ammoniac » il faut inonder le marin. Or, l'excavation du tunnel des Grands Goulets se faisant en montant et le chantier ne disposant pas de réserve d'eau suffisante, l'inondation du marin n'a pas pu être mise en œuvre. Il fallait donc agir sur la ventilation. Celle-ci fut mise en œuvre en trois phases :

- la première : mise en route d'aspiration (18 m<sup>3</sup>/s) au plus proche du front, soit à une distance comprise entre 35 m et 50 m. L'aspiration était avancée une fois par semaine;
- la seconde : après dix minutes d'aspiration, mise en route de la ventilation soufflante (40 m<sup>3</sup>/s) en retrait d'une dizaine de mètres de l'extracteur;
- la troisième : après vingt minutes, positionnement au front d'un ventilateur auxiliaire mobile associé à une pulvérisation d'eau pour brasser les gaz et faire tomber les poussières (photos 11 et 12).

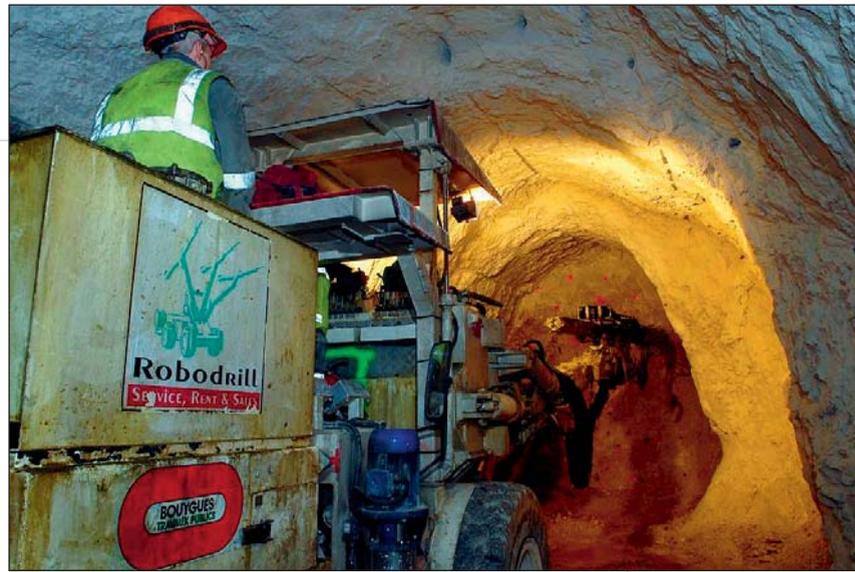


Photo 12

Vue d'une galerie de sécurité en foration (deux bras)  
View of a safety gallery being drilled (2 arms)

## ■ Le revêtement du tunnel

Le revêtement du tunnel se compose d'un complexe associant une étanchéité extradossée PVC à une coque en béton non armé dont l'épaisseur minimum varie entre 30 et 45 cm.

### L'étanchéité

Dans les tunnels, l'infiltration des eaux du massif est souvent la cause de dégradation des structures. Le tunnel des Grands Goulets a donc été conçu dès l'origine pour être étanche.

Le complexe d'étanchéité mis en place se compose de quatre éléments :

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### **Maître d'ouvrage**

Conseil général de la Drôme

##### **Maître d'œuvre**

Egis Tunnels

##### **Sous-traitants et prestataires**

- Matériel de foration : Robodrill
- Explosif : Kinsite - Nitro-Bickford
- Soutènement : Arcane matériel technique (cintres) - Emcor (boulons à friction)
- Marinage - Terrassement extérieur : DTP Terrassement
- Capteurs sismiques : Yso consultant
- Étanchéité : GCC
- Béton : Béton Rhône Alpes - MBT (adjuvants) - Chryso (fibre polypropylène)
- Contrôle béton : Sigma Béton
- Coffrage : Ducrocq Industrie

##### **VRD**

- Agilis (bordure de trottoirs)
- France Bonhomme (PVC et conduite fonte)

##### **Chaussée**

Colas

##### **Peinture**

HTTP

## Le tunnel des Grands Goulets sur la RD 518

Photo 13

Étanchéité de la section courante posée par l'entreprise GCC

*Sealing for the continuous section placed by the contractor GCC*

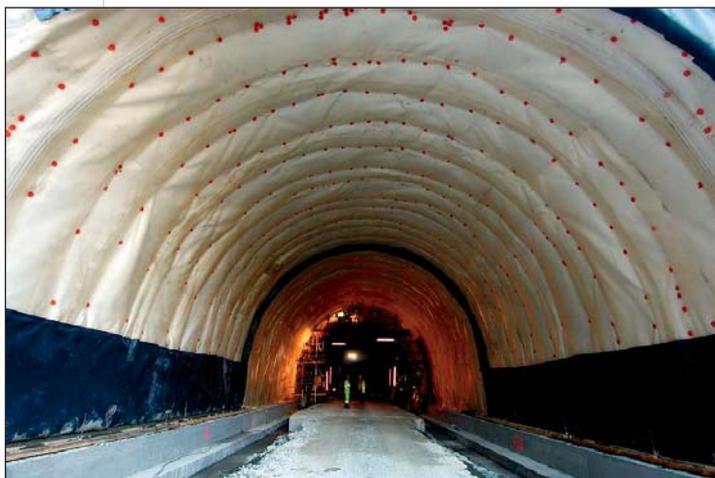


Photo 14

Coffrage voûte en tunnel

*Arch formwork in tunnel*



- une feuille drainante en polyéthylène (Delta MS) posée systématiquement en base de piédroit sur une hauteur de 1 m et en voûte à la demande en cas de venue d'eau au travers du soutènement;
- un géotextile 600 g ou 1000 g/m<sup>2</sup> (moquette) cloué sur le béton projeté par des fixations intégrant une rondelle orange en PVC;
- une feuille de PVC translucide 20/10 thermocollée sur les rondelles PVC orange ce qui évite de percer la feuille PVC. Les feuilles de PVC sont posées par bandes de 2 m de large thermocollées mécaniquement entre elles par des soudeurs certifiés Asqual;
- une feuille de PVC de protection mécanique noire 19/10 qui est posée au droit des masques, des arrêts de bétonnage et en base de piédroit.

L'ensemble du complexe est raccordé sur un drain PVC noyé dans la banquette de la voûte. L'étanchéité est réalisée par l'entreprise GCC (photo 13).

### Le béton projeté fibre polypropylène

Pour éviter la perforation de l'étanchéité lors de sa mise en œuvre sur le support, une couche de 3 cm de béton non fibré a été projetée pour recouvrir les fibres métalliques. En cours de travaux, des essais ont validé l'utilisation de fibres polypropylène pour remplacer les fibres métalliques et ainsi éviter la mise en œuvre de la couche de béton projeté non fibré de protection. Les 30 kg de fibres métalliques par mètre cube de béton sont remplacés par 7 kg de fibres polypropylène. Cette disposition permet d'obtenir un béton projeté fibré aux caractéristiques équivalentes.

### Le contrôle du profil avant la pose de l'étanchéité

La pose de ce complexe est réalisée après le contrôle du gabarit du tunnel excavé. Ce contrôle est réalisé dans un premier temps à l'aide d'un scanner 3D qui « photographie » le tunnel en trois dimensions. Les sous-profils sont ainsi détectés à l'écran grâce à des profils espacés de quelques centimètres. Le traitement des sous-profils peut ainsi être organisé bien avant l'arrivée du gabarit de contrôle physique monté sur un portique.

### La voûte béton

Le béton de revêtement est un béton C25/30 dosé à 280 kg de ciment et 50 kg de cendre par mètre cube, ceci pour limiter la montée en température dans les premières heures qui suivent sa mise en œuvre. Sa maniabilité a été réglée sur 3 h pour tenir compte des temps de transport. Quant à la résistance minimum à atteindre pour décoffrer, elle est fixée à 8 MPa.

Le béton de revêtement est réalisé à l'aide d'un coffrage marchant précontraint long de 12,5 m, pesant environ 150 t, équipé de 44 vibreurs électriques et d'un distributeur de béton. L'outil défini par Bouygues TP a été conçu et fabriqué par Ducrocq Industries.

Il avance sur quatre « pieds marchant » équipés de vérins hydrauliques à la vitesse de 12,5 m en 30 minutes. Le système de « pieds marchant » évite l'usage des rails et le risque de glissement induit par la pente de 4,71 %.

Les volumes des plots de voûtes varient entre 110 m<sup>3</sup> et 300 m<sup>3</sup> totalisant 22000 m<sup>3</sup> de béton.

La capacité de la pompe à béton électrique est égale à 50 m<sup>3</sup>/h. L'utilisation d'une pompe sur camion n'a pas été retenue à cause des caniveaux latéraux creusés pour recevoir les conduites de drainage qui réduisent à 5 m la largeur de la chaussée circulaire en phase travaux.

Le bétonnage est assuré depuis les centrales du réseau Béton Rhône Alpes d'Auberives (à 35 minutes) et de Saint-Marcellin (à 45 minutes) par la tête aval à l'aide



Photo 15

Coffrage voûte tête aval

Arch formwork at the downstream portal

de sept à huit toupies en rotation. Les travaux de bétonnage de la voûte ont été lancés après 1 100 m de creusement. Dans un premier temps, la voûte est réalisée à une cadence d'un plot tous les deux jours avant de passer à un plot par jour après le percement (photos 14 et 15).

### La chaussée

Le chantier a fait appel à la société Agilis pour réaliser les bordures de trottoirs avec un coffrage glissant.

La chaussée est de conception classique. Elle est réalisée par Colas. Les produits d'excavation du tunnel sont réutilisés après concassage par Colas pour réaliser la première couche de grave 0-30 non traitée (épaisseur comprise entre 10 et 20 cm). Une couche de grave traitée de 10 cm est mise en œuvre avant les 6 cm d'enrobés.

### Conclusion

Le tunnel des Grands Goulets aura été l'occasion pour Bouygues Travaux Publics et ses partenaires, de réaliser au cœur d'un site grandiose et dangereux le rêve de toute une population, un rêve porté par le Conseil général de la Drôme, maître d'ouvrage de l'opération, plus de 150 ans après la construction de la route historique des Grands Goulets.

Ce chantier aura permis également de mettre au point et d'améliorer de nombreuses techniques comme l'explosif, le béton projeté, le coffrage et le scanner 3D.

Ce chantier aura enfin été une formidable aventure humaine, une chance pour de nombreux jeunes et moins jeunes originaires de la région, de découvrir le monde des travaux publics et des travaux souterrains en particulier. ■

## ABSTRACT

### The Grands Goulets tunnel on county road RD518

R. Kabbaj

May 2005 - December 2007 : Bouygues TP is constructing the Grands Goulets tunnel on behalf of the "Conseil général" (County Council) of the Drôme region as part of work to improve safety on the Grands Goulets road. This road, on which falling blocks and rock slides sometimes occur, was cut out of the cliff side more than one hundred and fifty years ago. This vital artery links the Vercors Plateau to the Isère Valley via the Vernaison Valley, where the environment is very sensitive. The Grands Goulets tunnel is an opportunity for the personnel of Bouygues TP to apply, for the first time in France, numerous techniques in fields as diverse as emulsion explosive, the use of synthetic fibres in shotcrete, and the use of mobile tunnel formwork. It is also a sensitive site which must take into account numerous specific environmental features, stability of the cliff, protection of fauna and flora, not to mention allowance for the expectations of the population in terms of both employment but also conservation of its living environment.

## RESUMEN ESPAÑOL

### El túnel de Les Grands Goulets en la carretera departamental RD518

R. Kabbaj

Mayo de 2005 - Diciembre de 2007 : Bouygues TP ejecuta el túnel de Les Grands Goulets por cuenta de la diputación provincial del departamento de la Drôme en el marco de los trabajos de protección y seguridad de la carretera de Les Grands Goulets. Esta carretera sujeta a diversas caídas de bloques y desprendimientos fue excavada por el ladero del acantilado hace ya más de ciento cincuenta años. Este eje primordial pone en comunicación la meseta del Vercors con el valle del Isère pasando por el valle de la Vernaison, un sitio medioambiental sumamente sensible. El túnel de Les Grands Goulets constituye la ocasión para los equipos de Bouygues TP poner en aplicación, por vez primera en Francia, numerosas técnicas en sectores tan diversificados como el explosivo en emulsión, el empleo de fibras sintéticas en el hormigón proyectado, y la utilización de un encofrado túnel autodesplazable. También se trata de una obra delicada que debe tener en cuenta numerosas especificidades medioambientales, estabilidad del acantilado, preservación de la fauna y de la flora, sin olvidar la integración de las expectativas de la población simultáneamente en términos de empleo así como de respeto de su marco de vida.

# Descenderie de La Praz. Lyon-Turin

**La descenderie de la Praz, située sur les communes de Saint-André et Orelle (Savoie), s'inscrit dans le cadre de la nouvelle liaison ferroviaire fret et voyageurs Lyon - Turin, dont LTF (Lyon Turin Ferroviaire) est le promoteur. Plus précisément, dans le cadre de la construction du tunnel bi-tubes de base de l'ordre de 53 km de longueur qui reliera la vallée de la Maurienne en France, au Val de Suse, en Italie. LTF, créé en 2001 dans le prolongement de l'accord historique entre la France et l'Italie sur le Lyon-Turin, est la filiale commune de RFF et de son homologue italien RFI. Le chantier, placé sous hautes préoccupations environnementales, se distingue par une installation d'exhaure particulièrement sophistiquée qui demeurera en fonctionnement à l'issue du chantier.**

La descenderie répond à un triple objectif. Elle permettra, tout d'abord, de caractériser les différents types de géologie rencontrés en effectuant des campagnes de reconnaissance – extensomètres, vérins plats, essais à la plaque – *in situ* des roches et rochers dans lesquels sera percé le futur tunnel, et d'appréhender ainsi, au mieux, ses conditions de réalisation. Elle sera également utilisée comme point d'accès intermédiaire afin de réduire les délais de construction du tunnel de base, en offrant la possibilité de créer deux points d'attaque supplémentaires. L'ouvrage servira aussi pour la ventilation du futur

tunnel et en tant que porte d'accès pour les équipes de maintenance et de secours chargées d'intervenir en cas d'incident. Dans la pratique la descenderie de La Praz est un ouvrage d'environ 2572 m de longueur et 75 m<sup>2</sup> (10,5 m de large sur 6,70 m de hauteur) de section finie.

Le chantier représente un marché de 61,5 millions d'euros HT. Le profil se caractérise par une pente à 12 % et un virage de 220 m de rayon sur 400 m de longueur, le point le plus bas se situant à 300 m de dénivelé sous une couverture de 700 m à l'extrémité.

Les travaux, qui s'effectuent à l'explosif, utilisent un mélange à émulsion. Technique qui offre de gros avantages en termes de sécurité, les produits employés ne présentant aucun caractère explosif pris séparément. Les trois composants de la formulation sont mélangés dans une unité MORSE®, montée sur un camion porteur classique 4 x 4, puis injectés par deux canules dans les forages réalisés préalablement par un jumbo automatisé trois bras Atlas Copco.

Autres avantages de la technique : rapidité de mise en œuvre et absence d'imbrûlés en fin de tir. Côté sécurité, le front de taille est équipé d'un système de détection des gaz (CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S NH<sub>3</sub>) à l'avancement, avec alarme sonore et visuelle, ainsi que de cellules fixes de survie coupe-feu 2 heures (une première au PM 1000, la seconde sera positionnée au PM 2000) avec rideau d'eau. Ces deux containers, alimentés en air comprimé par l'intermédiaire d'un tuyau noyé dans le radier, sont en surpression permanente par rapport à l'environnement du tunnel.

Les ouvriers sont par ailleurs dotés d'un badge électronique radiofréquence qui facilite la détection des hommes présents en galerie, en cas d'accident. Ces puces « tracent » également les engins qui circulent dans l'emprise de la galerie d'où la possibilité, pour les pompiers, de connaître en permanence les matériels qui évoluent sur le chantier.

## ■ Un marché en risques partagés

Dans la pratique les excavations ont débuté le 16 janvier 2006, en protégeant la tête de la galerie au moyen d'une casquette en cintres métalliques. Contractuellement, le marché est basé sur le partage de risques entre le groupement d'entreprises et le maître d'ouvrage.

Ce mode de fonctionnement particulier, inspiré des marchés suisses, constitue une première dans l'Hexagone, en distinguant les conditions normales d'exécution des conditions définies dans le marché comme exceptionnelles – venues d'eau > 40 litres/s, terrains bouillants, cloches, éboulements, convergences, fronts mixtes – configurations pour lesquelles le chantier peut être temporairement immobilisé, ou déclaré

Photo 1  
Système de détection de gaz à front  
System for detection of gas at the tunnel face



# Tête de pont du LGV

**Paul Roux**  
Directeur de Projet  
Spie batignolles TPCI



Photo 2

**Boulonneur équipé pour le scellement à la résine**  
*Bolting machine equipped for resin grouting*

en marche dégradée. Il explique que la durée de réalisation, calculée sur la base d'hypothèses, mentionne un délai global de 1107,2 jours (soit 36,4 mois) sans date d'achèvement contractuelle, celle-ci pouvant être révisée en fonction des conditions géologiques, géotechniques et hydrologiques réellement rencontrées. Cette disposition contractuelle présente, entre autres,

l'extrême avantage d'offrir une très grande capacité de réactivité du groupement d'entreprises face aux aléas pouvant survenir.

Le marché prévoyait également une durée de 26 jours de mise en cadence du chantier, les rendements contractuels étant par ailleurs déterminés en fonction de la nature des terrains rencontrés, ceux-ci étant répartis en six classes correspondant à des avancements variables de moins de 1 m/j à plus de 7 m/j. Du point de vue géologique, les travaux se déroulent dans la formation du houiller stérile. Un sous-sol très hétérogène dont la composition varie de schistes gréseux aux grès schisteux, en passant par le grès à grains fins, des passages de schistes noirs charbonneux et de nombreux filons de quartz étant par ailleurs susceptibles d'être traversés.

## ■ Un large éventail de soutènements

Les problèmes liés à la nature aquifère de certaines zones ne sont pas exclus, des arrivées d'eau à 29 bars de pression ayant déjà été rencontrées. Pour faire face à ce type d'éventualité, les aquifères peuvent être étanchées à l'avancement au moyen d'injections, l'objectif étant de contenir un maximum d'eau à l'extérieur du périmètre terrassé.

Quant au réseau d'exhaure (cf. encadré « Une exhaure performante ») il présente la particularité d'être définitif, l'installation étant maintenue en activité à l'issue du chantier. La disparité géologique se traduit par une grande variété de soutènements, les travaux faisant appel à pratiquement toutes les techniques en vigueur. Dans les terrains sains, c'est un soutènement léger par boulonnage et béton projeté qui est adopté. Les boulons, mis en œuvre par deux boulonneurs automatiques Atlas Copco à des longueurs comprises entre 3 et 5 m, sont essentiellement de type Swellex ou HA 25

## Une exhaure performante

L'installation de pompage des eaux d'exhaure est constituée d'une série de pompes capables d'assurer un débit de 150 litres/s, des pompes sont maintenues en réserve afin de pouvoir monter jusqu'à 300 litres/s.

L'eau chargée de matières en suspension est tout d'abord renvoyée dans un dessableur, puis évacuée vers la surface via deux canalisations de 325 mm de diamètre – la possibilité d'installer une troisième conduite est prévue – jusqu'à un bassin de décantation, de 17 x 50 m, dans lequel est réalisé un traitement par floculation. Les boues récupérées sont acheminées jusqu'à une presse qui les transforme en galettes de matières sèches, celles-ci étant ensuite évacuées avec les déblais de marinage.

À la sortie du bassin, un dispositif d'injection de CO<sub>2</sub> ramène le pH jusqu'à une valeur limite de 8,5, le traitement étant au final complété par un déshuileur qui élimine les dernières traces d'hydrocarbures. L'eau présente alors des caractéristiques physico-chimiques compatibles avec son rejet dans la rivière voisine de l'Arc.

## FICHE TECHNIQUE

### **Maître d'ouvrage**

LTF (Lyon Turin Ferroviaire)

### **Maître d'œuvre**

SPI (Schmidhalter & Pfammater Ingénieurs)

### **Coordonnateur SPS**

Presents

### **Entreprises**

Groupement solidaire Spie batignolles TPCI (mandataire) – Sotrabas – Ghella – Cogeis

### **Montant du marché**

61,5 millions d'euros (HT)

Descenderie de La Praz. Tête de pont du LGV Lyon-Turin

Photo 1

Bétonnage du radier définitif

Concreting of the permanent foundation raft



Photo 4

Presse à boue  
Sludge press



Photo 5

Préparation d'un cintre à l'extérieur de la galerie  
Preparation of a centre on the outside of the gallery



Photo 6

Pelle mécanique de purge  
Shovel excavator for rock removal



Photo 7

Évacuation des déblais - Marinage  
Removal of earth cuts - Muck removal



scellés à la résine. L'application du béton projeté, réalisée par deux robots Normet, s'effectue en plusieurs passes de 5 à 10 cm d'épaisseur, le mélange pouvant être fibré pour les couches de confinement et de protection du front de taille. Pour des raisons de sécurité, ce dernier peut être stabilisé par des boulons en fibre de verre de 12 m de longueur, injectés à la résine aqua-réactive ou au coulis de ciment.

Dans les terrains délicats, un blindage lourd par cintres métalliques HEB 200 ou cintres réticulés est adopté, la pose des éléments de 1,5 t s'effectuant par l'intermédiaire d'une nacelle équipée d'une pince à cintres. Le blindage, réalisé au moyen de tôles de 3 à 5 mm d'épaisseur permet de créer, sur l'intrados des cintres, un coffrage dans lequel est coulé le béton, la coque formée assurant ainsi la reprise des efforts de compression.

Dans les zones particulièrement difficiles une mini-voûte parapluie (forepoling) peut être créée au moyen de boulons autoforants de 6 m de longueur, pouvant être injectés à la résine ou au coulis de ciment.

À l'arrière du front de taille, environ 200 m en retrait, le radier de 15 cm d'épaisseur est construit en deux phases, par demi-largeur. Pour le préradier, réalisé entre 20 et 40 m du front, un béton compacté au rouleau (BCR) est employé dans les parties sèches, alors qu'un B25 classique est coulé en cas de venues d'eau. Tous les bétons sont acheminés de la centrale voisine de Modane.

Fin septembre 2007, après 603 tirs, le chantier se trouvait au PM 1211, 49 % du tracé ayant donc été réalisés. L'avancement global moyen est, à ce jour, de 1,9 m/jour, le meilleur résultat étant de 30 m en une semaine. ■

#### LES PRINCIPALES QUANTITÉS PRÉVISIONNELLES

- Déblais souterrains en descenderie : 225 000 m<sup>3</sup>
- Déblais souterrains ouvrages divers : 38 000 m<sup>3</sup>
- Transport et mise en décharge : 263 000 m<sup>3</sup>
- Béton de blocage : 2 500 m<sup>3</sup>
- Béton projeté : 19 800 m<sup>3</sup>
- Béton de radier et BCR : 14 400 m<sup>3</sup>
- Injections de traitement de terrains : 400 m<sup>3</sup>
- Boulons d'ancrage : 150 000 m
- Boulons fibres de verre : 20 000 m
- Sondages de reconnaissance : 11 500 m
- Forages pour travaux spéciaux : 3 000 m
- Cintres métalliques et blindages : 1 000 t
- Heures de travail : 500 000 heures
- Effectif moyen : 100 personnes

#### ABSTRACT

##### *La Praz inclined gallery : Bridgehead of the Lyons- Turin high-speed train line*

P. Roux

*The La Praz inclined gallery, located in the district of Saint-André et Orelle (Savoie), forms part of the project for the new Lyons-Turin freight and passenger rail link. The works are performed by explosive, using an emulsion mix pumped from a MORSE® unit mounted on a conventional 4WD type rigid truck. This innovative technique offers major advantages in terms of safety, because the products used are by no means explosive taken separately. Other advantages : speed of application and no combustion residues at the end of the blast. Regarding safety, the tunnel face is equipped with a system for gas detection as it moves forward, with an audible and visual alarm, and 2-hour fire-resistant survival compartments with water curtain. These containers, supplied with compressed air via a pipe embedded in the foundation raft, are in constant overpressure relative to the tunnel environment.*

#### RESUMEN ESPAÑOL

##### *Galería en pendiente de La Praz : Cabeza de puente de la línea de alta velocidad Lyón-Turín*

P. Roux

*La galería en pendiente de La Praz, ubicada en el municipio de Saint-André et Orelle (Saboya), se inscribe en el proyecto del nuevo enlace ferroviario de carga y viajeros Lyon-Turín. Los trabajos se efectúan mediante explosivos, gracia a una mezcla de emulsión bombeada desde una unidad MORSE® montada sobre un camión portador convencional de tipo 4x4. Esta técnica innovadora brinda importantes ventajas en términos de seguridad dado que los productos utilizados por separado no presentan ningún carácter explosivo. Otras ventajas : rapidez de implementación e inexistencia de inquemados al final del tiro. Lado seguridad, el frente de cantera va dotado de un sistema de detección de los gases según el avance, con alarma sonora y visual, así como células de supervivencia cortafuego 2 horas con pantalla de agua. Estos contenedores, alimentados con aire comprimido por medio de un tubo inmerso en la solera, se encuentran en sobrepresión permanente en relación al entorno del túnel.*

# Le tunnel des Grands Goulets sur la RD518



**Rachid Kabbaj**  
Chef de service travaux  
Bouygues TP

**Mai 2005 - Décembre 2007: Bouygues TP réalise le tunnel des Grands Goulets pour le compte du Conseil général de la Drôme dans le cadre de travaux de sécurisation de la route des Grands Goulets. Cette route sujette à des chutes de blocs et des éboulements a été taillée à flanc de falaise il y a plus de cent cinquante ans. Cet axe vital relie le plateau du Vercors à la vallée de l'Isère en empruntant la vallée de la Vernaison, un site environnemental très sensible. Le tunnel des Grands Goulets est l'occasion pour les équipes de Bouygues TP de mettre en œuvre, pour la première fois en France, de nombreuses techniques dans des domaines aussi divers que l'explosif en émulsion, l'emploi de fibres synthétiques dans le béton projeté, et l'utilisation d'un coffrage tunnel marchant. C'est aussi un chantier délicat qui doit prendre en compte de nombreuses spécificités environnementales, stabilité de la falaise, préservation de la faune et de la flore, sans oublier la prise en compte des attentes de la population à la fois en termes d'emploi mais aussi de respect de son cadre de vie.**

Le projet du tunnel des Grands Goulets s'inscrit dans le cadre d'un projet de sécurisation de la très célèbre route du même nom. Cet itinéraire relie, au nord du département de la Drôme, la vallée de l'Isère et la région du Royans au plateau du Vercors.

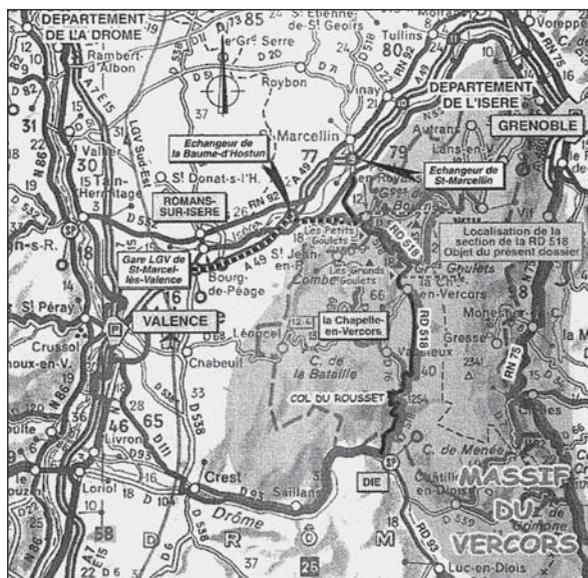
La route des Grands Goulets a été édifiée à flanc de falaise il y a déjà 150 ans. Cette falaise calcaire haute de plus de cent mètres est sujette à des chutes de blocs quotidiennes mais aussi à des éboulements de plusieurs centaines de mètres cubes. Ces éboulements entraînent systématiquement la fermeture pour plusieurs mois de la route départementale entre Barraques-en-vercors et Echevis. D'importants travaux de confortement et de sécurisation de la falaise sont réalisés tous les ans pour maintenir en service cet accès vital au développement du plateau.

Voilà, pourquoi la réalisation d'un tunnel long de 1683 m qui était attendu depuis des décennies par la population a été votée à l'unanimité par le département de la Drôme.

Le service technique départemental de la Drôme assure la maîtrise d'ouvrage et la gestion globale de l'opération. La surveillance du chantier et la maîtrise d'œuvre ont été confiées à la société Egis Tunnels par le Conseil général de la Drôme.

Le 3 mai 2005, Bouygues Travaux Publics a reçu l'ordre de service de début des travaux. Les travaux du tunnel, creusement et revêtement mais aussi, VRD, chaussée, peinture des piédroits et ouvrages extérieurs, doivent être réalisés dans un délai de 32 mois.

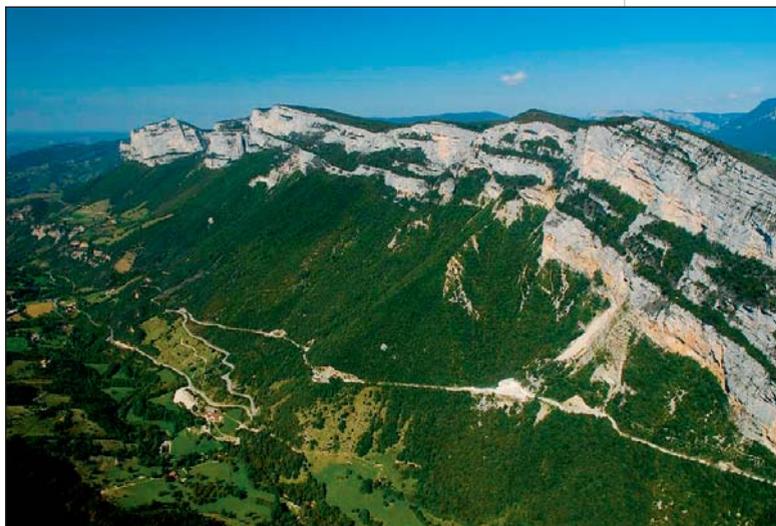
Rappelons enfin, que l'ouvrage se situe dans le parc régional du Vercors. Les contraintes d'exécution liées à l'environnement sont particulièrement fortes. Véritable joyau touristique, le site classé des Grands Goulets abrite, en effet, une faune et une flore sensibles et remarquables (figure 1 et photo 1).



**Figure 1**  
Carte de la région  
et localisation du tunnel  
Map of the region  
and tunnel location

**Photo 1**

La RD 518 sinuant dans la vallée  
County road RD 518 winding through the valley



## Le tunnel des Grands Goulets sur la RD 518

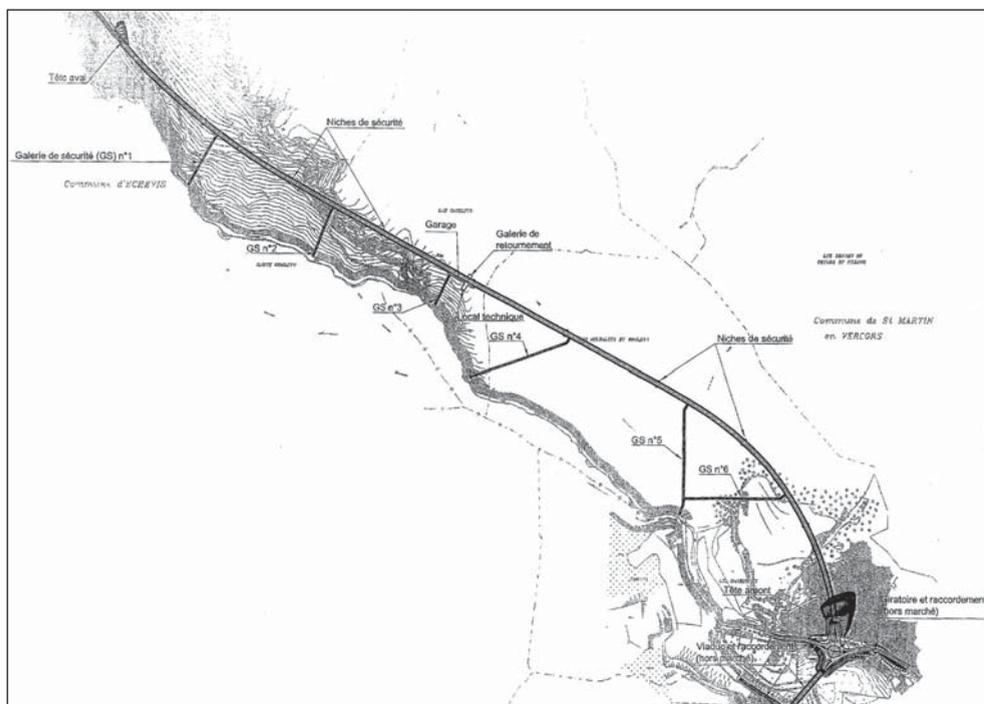


Figure 2  
Tracé détaillé  
du tunnel  
Detailed tunnel  
alignment

### ■ L'ouvrage

Le marché de travaux génie civil se décompose en plusieurs lots comprenant : le tunnel, les têtes et les autres travaux.

#### Le tunnel

L'ouvrage est un tunnel monotube long de 1 650 m offrant une chaussée de 7 m de large. Il est excavé dans des calcaires rocheux sur 1 500 m en attaque montante et dans des sables grésifiés sur 150 m en attaque descendante. Le tunnel présente une section courante excavée de 70 m<sup>2</sup> et une pente constante de 4,71 % sur toute sa longueur.

Pour répondre à la circulaire sur la sécurité 2000-63 :

- le tunnel est équipé de six galeries de sécurité de 15 m<sup>2</sup> de section. Ces galeries sont espacées tous les 250 m. Elles totalisent une longueur totale de 850 m excavés dans les calcaires. Les longueurs des galeries varient entre 50 m pour la plus courte et 210 m pour la plus longue. Toutes disposent d'un sas de 10 m de long côté tunnel. Elles se raccordent à l'ancienne route des Grands Goulets grâce à une ouverture volontairement discrète, qui n'autorise que le passage des piétons ;
- à 700 m de l'entrée aval, le tunnel s'élargit de 3 m sur une longueur de 56 m, portant la section excavée à 110 m<sup>2</sup>. Au droit de ce tronçon, est excavée perpendiculairement à l'axe du tunnel, une aire de retournement (qui permet à un poids lourd de faire demi-tour en cas d'incident) et un local technique ;
- des niches de sécurité sont positionnées tous les 250 m (figure 2).

### Les têtes

La conception architecturale des têtes de tunnel a été confiée par le maître d'ouvrage au groupement Jacques Dolveck, paysagiste, et Christophe Céron, Charles Lavigne, architectes. Les ouvrages de la tête amont sur le hameau de Barraques-en-Vercors se composent de la tête de tunnel architecturale intégrant un local technique et un local pompier, d'un bassin de rétention des eaux et d'un bassin réservoir incendie doté d'une capacité de stockage de 120 m<sup>3</sup> d'eau, minimum nécessaire disponible en cas d'incendie en tunnel pendant la première heure d'intervention.

Les ouvrages de la tête aval sur la commune d'Echevis se composent d'un ouvrage architectural qui vient souligner une entrée en tunnel tangente à la falaise calcaire et d'un bassin de rétention enterré sous la route départementale dont la vocation est de contenir toute pollution des eaux à l'intérieur de l'ouvrage.

### Les autres travaux

La chaussée souple est composée d'une couche de grave naturelle comprise entre 10 cm et 20 cm, d'une couche de grave traitée de 10 cm d'épaisseur et de 6 cm d'enrobés. Les VRD représentent plusieurs dizaines de kilomètres de conduites et fourreaux de tous types et de toutes natures (conduite incendie fonte, conduite d'évacuation des eaux en PVC, passages de câbles, etc.). Enfin, la peinture qui parachève les parements sur une hauteur de 4 m au-dessus des trottoirs (figure 3).

### ■ L'environnement des travaux

Le projet de réalisation du tunnel des Grands Goulets vient s'inscrire au cœur d'une concentration de contraintes liées à l'environnement. En effet, le site des Grands Goulets se trouve dans un cadre environnemental particulièrement sensible :

- parc naturel régional du Vercors ;
- sites inscrits « Le Pavillon et les Barraques-en-Vercors » ;
- ZNIEFF de type 1 « cours moyen de la Vernaison », présence de pisciculture ;
- espace naturel sensible du département de la Drôme « Les Goulets » ;
- site Natura 2000 « sources et habitats rocheux de la Vernaison et des Goulets » ;
- les habitations de Barraques-en-Vercors à proximité desquelles s'inscrit la tête amont du projet.

La RD 518, très touristique à hauteur du site des Grands Goulets, ne devait rester fermée, à l'origine, que sur une période comprise entre le 1<sup>er</sup> septembre 2005 et le 1<sup>er</sup> juillet 2007.

Cet ensemble de contraintes va fortement influencer sur le choix des installations de chantier au droit des deux têtes aval et amont (photos 2 à 4).

### ■ Installations de chantier - Tête aval et tête amont

Les installations de chantier et les travaux de terrassements de la tête aval ont débuté le 5 juillet 2005. L'entreprise, en concertation avec les services de la DDE et le maître d'œuvre, parvient à éviter la mise en place d'un alternat sur le tronçon de la RD 518 en maintenant au droit de la tête aval une largeur de passage de 5 m, évitant ainsi, pour la saison touristique de l'été 2005, d'entraver la circulation des riverains et des touristes, nombreux à cette période.

Le 5 septembre 2005, la RD 518 est fermée provisoirement à la circulation. Compte tenu de la forte sensibilité à l'environnement du site l'entreprise choisit :

- d'installer ses bureaux dans l'hôtel *Le Refuge* situé à 2 km de la tête aval sur la RD 518;
- d'organiser le transport de son personnel depuis le village de Sainte-Eulalie et le chantier;
- d'installer des feux tricolores de part et d'autre des Petits Goulets pour limiter les risques d'accidents de circulation au droit de ce tronçon très étroit de la RD 518;
- d'utiliser les capacités de production béton des centrales de réseaux dont la plus proche est située sur la commune d'Auberives-en-Royans à 17 km, ou 30 minutes du chantier, les deux autres étant les centrales de Saint-Marcellin et de Villars-de-Lans;
- d'employer un explosif pompable évitant la mise en œuvre d'un stockage d'explosif lourd et le transport quotidien d'environ 2 t d'explosif sur des routes de montagne traversant de nombreux villages.;
- de réutiliser pour les remblais et les modelages des matériaux produits par l'excavation;
- de réutiliser, pour réaliser la première sous-couche de grave non traitée, des produits de l'excavation du tunnel préalablement concassés;
- d'aménager une station de traitement des eaux (MES et PH) capable de traiter un débit de 40 m<sup>3</sup>/h;
- de mettre en place des bacs de lavage des goulotte des camions toupies;
- d'installer une ligne de 20000 volts longue de 2 km dans les Grands Goulets pour alimenter en énergie la tête amont depuis le transformateur installé tête aval et éviter l'utilisation de groupe électrogène;
- de poser une conduite d'eau calorifugée longue de 2 km pour récupérer l'eau puisée aux Barraques-en-Vercors et l'amener par gravité jusqu'à la tête aval d'où elle est renvoyée dans le tunnel.

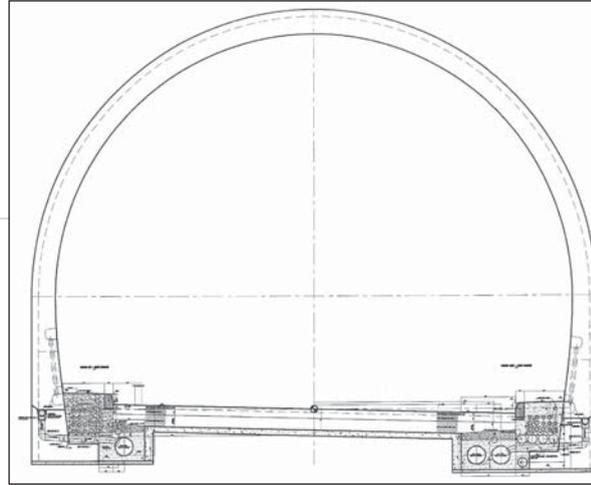


Figure 3  
Coupe type du tunnel  
Typical cross section  
of the tunnel



Photo 2  
Éboulement sur le RD 518 aux Barraques-en-Vercors  
Rock slide on RD 518 at Barraques-en-Vercors



Photo 3  
La Vernaison dans les Grands  
Goulets  
La Vernaison in the Grands Goulets

La fermeture de la RD 518 devient définitive après un éboulement de plus de 1200 m<sup>3</sup> de rocher dans la nuit du 13 au 14 décembre 2005. Cet éboulement emporte la route sur une dizaine de mètres et vient rappeler à tous les intervenants la nécessité de réaliser l'ouvrage.

Un dernier facteur important lié à l'environnement a été pris en compte : la population locale. En effet, les équipes travaux de Bouygues Travaux Publics se sont fortement mobilisées aux côtés du département de la Drôme et des élus du Vercors et du Royans pour que la population soit associée aux travaux du tunnel des Grands Goulets, le plus grand chantier de travaux publics du département.

Photo 4  
Les chutes de cailloux  
sur la RD 518  
Stone falls on county road RD 518

## Le tunnel des Grands Goulets sur la RD 518

Photo 5

Installations de chantier aval -  
Ateliers

*Downstream construction  
plant - Equipment*



Photo 6

Traitement des eaux tête aval

*Downstream portal water  
treatment*



Le chantier aura ainsi fait appel, pour plus de la moitié de ses effectifs, à des personnes originaires de la région. De nombreuses journées portes ouvertes et autres visites de scolaires et d'associations ont été organisées en association avec le Conseil général.

Par ailleurs, l'itinéraire de transhumance par les Grands Goulets restera ouvert aux troupeaux malgré les travaux (photos 5 et 6).

### ■ L'excavation du tunnel des Grands Goulets

#### La géologie

Le projet du tunnel des Grands Goulets vient s'inscrire dans un horizon géologique appartenant au Crétacé inférieur et supérieur.

Différentes natures de terrain depuis l'aval vers l'amont se succèdent ainsi :

- l'entrée aval vient s'inscrire dans un éboulis masquant totalement la falaise rocheuse en cet endroit, détail qui va conduire l'entreprise à définir au fur et à mesure des travaux d'excavation l'ensemble des méthodes de réalisation de l'ouvrage d'entrée aval;

- la première nature géologique rencontrée ensuite sont les barrémiens qui se caractérisent généralement par des calcaires compacts pour partie altérés par des karsts.

- la seconde nature géologique correspond aux calcaires blancs massifs coralliens.

Vient ensuite une succession stratigraphique plus complexe et hétérogène – Bédoulien Aptien et Albien (sables) – très fortement altérés par la présence de karsts actifs et passifs que l'excavation va mettre au jour.

La qualité des roches va déterminer les deux méthodes d'excavation mises en œuvre sur ce projet.

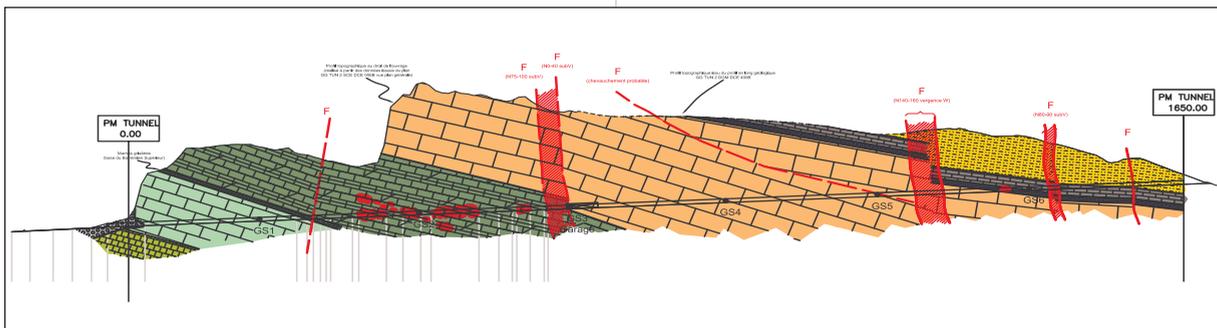
Entre les points métriques 0 et 1500, le tunnel est excavé à l'explosif depuis la tête aval en attaque montante afin de permettre l'écoulement des eaux d'exhaure vers l'aval et la station de traitement. La foration est réalisée avec un robot trois bras automatiques type Robodrill et l'explosif utilisé est une émulsion pompable développée par Nitro-Bickford.

Le marinage est assuré par DTP Terrassement à l'aide d'un chargeur à godet à déversement latéral et d'une flotte de sept tombereaux automoteurs. Le soutènement se compose de boulons à friction longs de 4 m associés à une épaisseur de béton projeté fibré de 7 ou 12 cm selon les profils, mis en œuvre avec un robot Normet. Une nacelle Normet électrique, équipée de deux bras est utilisée pour poser les boulons à friction qui constituent l'essentiel du soutènement dans les zones de bonne tenue. Dans les zones délicates, le soutènement est réalisé avec des cintres en HEB 180 remplis de béton projeté non fibré. Dix tirs sont réalisés par semaine conduisant à des avancements de plus de 45 m par semaine.

Entre les points métriques 1650 et 1550, le tunnel est excavé depuis la tête amont avec une machine à attaque ponctuelle d'une puissance égale à 200 kW. Les travaux ont débuté en septembre 2005 avec l'objectif de sortir du chemin critique l'excavation de ce tronçon.

L'attaque se fait en descendant en deux phases. Dans un premier temps, réalisation de la demi-section supérieure à l'abri d'un soutènement fait de cintres à oreilles en HEB 180 espacés tous les mètres puis tous les 1,5 m. Le vide entre les cintres est rempli d'un béton projeté non fibré. Les sables grésifiés étant très sensibles à l'eau, un radier béton est réalisé à l'avancement.

Une fois la demi-section supérieure excavée et soutenue, le stross est abattu toujours avec la machine à attaque ponctuelle. Les cintres en appui sont repris en sous-œuvre. Enfin, pour fermer la section, sept plots de contre-voûte de 12,5 m de long sont réalisés depuis le front rocheux en remontant vers la tête amont. Dix cintres sont posés par semaine.



**Figure 4**  
 Coupe géologique du tunnel des Grands Goulets avec profil en long  
*Geological cross section of the Grands Goulets tunnel with longitudinal profile*

Entre les points métriques 1550 et 1500, l'excavation depuis la tête amont se poursuit en descendant en demi-section supérieure dans un horizon mixte composé de sables grésifiés compatibles avec l'utilisation de la machine à attaque ponctuelle et de rocher très induré nécessitant l'emploi de l'explosif (figure 4).

### L'excavation des galeries de secours

L'excavation des galeries de secours est exécutée depuis le tunnel pour des raisons de sécurité liées aux chutes de blocs. Les terrains traversés étant calcaires, l'excavation est réalisée à l'explosif à l'identique de l'excavation du tunnel principal. Le système Morse a été dimensionné pour pouvoir circuler dans la galerie. Le soutènement est réalisé par des boulons HA de 2 m de long. Le revêtement est une coque en béton projeté fibré polypropylène.

Les principales dispositions prises sur le chantier pour réaliser ces galeries sont les suivantes :

- la section de la galerie sur les dix premiers mètres est portée de 9 m<sup>2</sup> (surface théorique) à 25 m<sup>2</sup>. Ainsi, en phase de creusement, les entrées des galeries peuvent être utilisées pour le demi-tour des engins de terrassement et des toupies béton;
- la section courante de la galerie de secours qui n'est pas revêtue a été volontairement augmentée de 9 m<sup>2</sup> à 15 m<sup>2</sup> environ. Cela permet d'utiliser un deux bras de foration et de moyens de marinage plus importants, ainsi que l'installation d'une gaine de ventilation de 800 mm de diamètre à une cinquantaine de mètres du front.

Au total, l'excavation du tunnel des Grands Goulets aura produit 150 000 m<sup>3</sup> de matériaux et nécessité la mise en œuvre d'environ 10 000 m<sup>3</sup> de béton projeté.

### ■ L'utilisation de l'explosif aux Grands Goulets

Deux dispositions majeures sont mises en œuvre de manière industrielle par Bouygues TP sur le chantier des Grands Goulets :

- le système Morse;
- le tir séquentiel non électrique.

Ces deux dispositions associées vont améliorer de manière significative la sécurité et la logistique d'emploi de l'explosif en tunnel.

### Le système Morse

En février 2006, pour la première fois en France métropolitaine, le système Morse (Module de repompage et de sensibilisation d'émulsion) développé par le groupe EPC au travers de sa filiale Nitrochimie, est mis en œuvre avec succès. Ce système se compose d'une unité de fabrication d'explosif comprenant :

- une cuve de 980 l pour la matrice agréée pour le transport de matières dangereuses par la route;
- trois réservoirs de 115 l pour le réactif 1, un correcteur d'acidité influençant la vitesse de gazéification, le réactif 2 l'agent gazéifiant et l'eau indispensable à la lubrification des canules et au nettoyage de l'outil après usage;
- quatre pompes dont le fonctionnement est assuré par un groupe hydraulique : une pompe pour la matrice type PCM, et trois autres pompes CAT pour les réactifs et l'eau;
- l'ensemble est géré par un automate de régulation en charge de la production et du chargement de l'explosif;
- enfin, deux canules diamètre 19 mm d'une longueur de 25 m chacune équipées en extrémité d'un mélangeur statique.

Aucune des matières livrées sur le chantier pour être embarquées sur le Morse n'est classée explosif. Le Morse et les produits nécessaires à la fabrication de l'émulsion sont stockés dans un hangar chauffé. L'émulsion a une densité comprise entre 0,9 et 1,2 kg par litre. L'émulsion a une sensibilité 1 000 fois moins sensible aux chocs que la dynamite.

Sur ce chantier, la capacité de production du Morse était égale à 1,2 t avec un débit de fabrication compris entre 30 et 50 kg minutes.

Le principe de fonctionnement du Morse permet de produire de l'explosif uniquement à l'extrémité de la

## Le tunnel des Grands Goulets sur la RD 518

Photo 7

Chargement d'un trou de mine

*Charging a blast hole*



Photo 8

Chargement d'une volée

*Charging a round*



Photo 9

Porteur Morse - Nitro Bickford  
Morse carrier - Nitro Bickford



Photo 10

Robot de foration trois bras Robodrill

*Robodrill 3-arm drilling robot*



canule de pompage qui est introduite dans le trou de mine. C'est le passage du mélange dans le mélangeur statique installé en bout de canule qui va assurer la gazéification et la sensibilisation de l'émulsion par homogénéisation des réactifs chimiques injectés conjointement. Le produit chargé dans le trou est du Nitram TX1. Ce produit ne devient explosif qu'après la fin de la réaction de sensibilisation et de gazéification alors qu'il a été chargé en fond de trou depuis une vingtaine de minutes (photos 7 à 10).

### Le plan de tir séquentiel

Le choix de l'émulsion va conduire le chantier à revoir les plans de tirs habituellement utilisés avec l'explosif encartouché.

La principale différence est que le produit occupe 100 % du volume contrairement à la cartouche. Toute la technique de l'utilisation de l'explosif en émulsion réside dans la bonne répartition d'énergie dans le massif.

Les diamètres de foration utilisés dans le plan de tir sont au nombre de trois :

- 48 mm pour les trous de contours et le bouchon;
- 57 mm pour les trous d'abattage et de radier;
- 127 mm pour les trous centraux vides.

Les longueurs de foration varient entre 1,5 m et 4,9 m en fonction de la qualité du rocher.

Le découpage soigné est réalisé en associant un cordeau détonnant 70 g par mètre, à une charge d'émulsion en fond de trou de 1,5 kg.

La charge spécifique moyenne en section courante oscille entre 2,1 kg et 2,5 kg au mètre cube.

### La séquence de mise à feu et les contrôles de vibration

Le tracé du tunnel évoluant entre 0 m et 200 m de la falaise surplombant la route départementale 518, de fortes contraintes sismiques au regard de la stabilité de la falaise étaient imposées au chantier. L'ensemble des tirs a été enregistré par un minimum de trois capteurs sismiques installés en falaise le long de la route des Grands Goulets.

L'utilisation d'un schéma d'amorçage non électrique (Nonel) a été retenue du fait de la meilleure résistance du tube de Nonel contrairement au fil électrique lors de l'introduction de la canule en fond de trou. L'émulsion étant un produit gras, il était aussi plus facile pour les utilisateurs de manipuler des tubes Nonel que des fils électriques.

Ainsi le détonateur Nonel va permettre de réaliser des tirs séquentiels en limitant à deux le nombre de trous partant dans le même intervalle de temps et à 2 s seulement l'ensemble de la séquence des 107 trous. Aucun dépassement de seuil ne sera enregistré sur ces tirs en pleine section.



Photo 11

Vue du tunnel avec les gaines de ventilation  
View of the tunnel with the ventilation shafts

### Les gaz de tir

Le principal phénomène constaté lors de l'utilisation de l'émulsion explosive est le très fort dégagement d'ammoniac (NH<sub>3</sub>).

Au chargement tout d'abord, parce que la réaction entre le nitrate d'ammonium contenu dans l'émulsion et la chaux contenue dans le béton projeté est immédiate. Aussi, pour limiter efficacement cet effet, le chargement doit être soigné et sans bavures.

Au tir, ensuite, qui produit de l'ammoniac et du monoxyde de carbone.

Pendant le marinage, enfin, lorsque les gaz emprisonnés dans le marin sont libérés au fur et à mesure de l'enlèvement. Les mesures de gaz ont été réalisées dans la cabine de conduite de la chargeuse, le poste de travail le plus exposé.

L'analyse des mesures de gaz enregistrées permet de conclure que pour limiter efficacement le risque « ammoniac » il faut inonder le marin. Or, l'excavation du tunnel des Grands Goulets se faisant en montant et le chantier ne disposant pas de réserve d'eau suffisante, l'inondation du marin n'a pas pu être mise en œuvre. Il fallait donc agir sur la ventilation. Celle-ci fut mise en œuvre en trois phases :

- la première : mise en route d'aspiration (18 m<sup>3</sup>/s) au plus proche du front, soit à une distance comprise entre 35 m et 50 m. L'aspiration était avancée une fois par semaine;
- la seconde : après dix minutes d'aspiration, mise en route de la ventilation soufflante (40 m<sup>3</sup>/s) en retrait d'une dizaine de mètres de l'extracteur;
- la troisième : après vingt minutes, positionnement au front d'un ventilateur auxiliaire mobile associé à une pulvérisation d'eau pour brasser les gaz et faire tomber les poussières (photos 11 et 12).

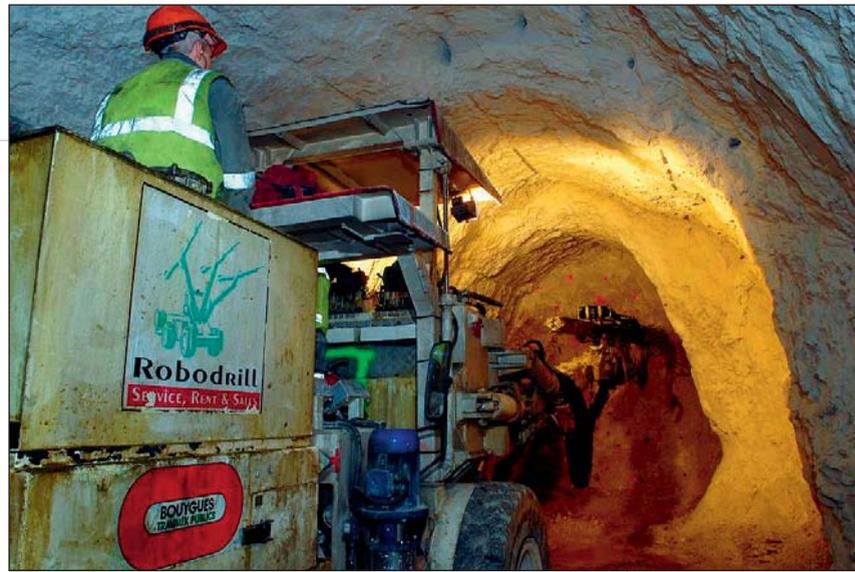


Photo 12

Vue d'une galerie de sécurité en foration (deux bras)  
View of a safety gallery being drilled (2 arms)

## ■ Le revêtement du tunnel

Le revêtement du tunnel se compose d'un complexe associant une étanchéité extradossée PVC à une coque en béton non armé dont l'épaisseur minimum varie entre 30 et 45 cm.

### L'étanchéité

Dans les tunnels, l'infiltration des eaux du massif est souvent la cause de dégradation des structures. Le tunnel des Grands Goulets a donc été conçu dès l'origine pour être étanche.

Le complexe d'étanchéité mis en place se compose de quatre éléments :

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### **Maître d'ouvrage**

Conseil général de la Drôme

##### **Maître d'œuvre**

Egis Tunnels

##### **Sous-traitants et prestataires**

- Matériel de foration : Robodrill
- Explosif : Kinsite - Nitro-Bickford
- Soutènement : Arcane matériel technique (cintres) - Emcor (boulons à friction)
- Marinage - Terrassement extérieur : DTP Terrassement
- Capteurs sismiques : Yso consultant
- Étanchéité : GCC
- Béton : Béton Rhône Alpes - MBT (adjuvants) - Chryso (fibre polypropylène)
- Contrôle béton : Sigma Béton
- Coffrage : Ducrocq Industrie

##### **VRD**

- Agilis (bordure de trottoirs)
- France Bonhomme (PVC et conduite fonte)

##### **Chaussée**

Colas

##### **Peinture**

HTTP

## Le tunnel des Grands Goulets sur la RD 518

Photo 13

Étanchéité de la section courante posée par l'entreprise GCC

*Sealing for the continuous section placed by the contractor GCC*

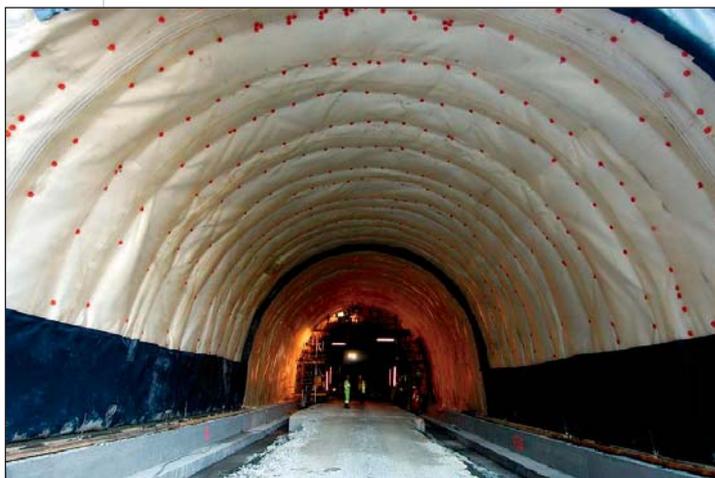


Photo 14

Coffrage voûte en tunnel

*Arch formwork in tunnel*



- une feuille drainante en polyéthylène (Delta MS) posée systématiquement en base de piédroit sur une hauteur de 1 m et en voûte à la demande en cas de venue d'eau au travers du soutènement;
- un géotextile 600 g ou 1000 g/m<sup>2</sup> (moquette) cloué sur le béton projeté par des fixations intégrant une rondelle orange en PVC;
- une feuille de PVC translucide 20/10 thermocollée sur les rondelles PVC orange ce qui évite de percer la feuille PVC. Les feuilles de PVC sont posées par bandes de 2 m de large thermocollées mécaniquement entre elles par des soudeurs certifiés Asqual;
- une feuille de PVC de protection mécanique noire 19/10 qui est posée au droit des masques, des arrêts de bétonnage et en base de piédroit.

L'ensemble du complexe est raccordé sur un drain PVC noyé dans la banquette de la voûte. L'étanchéité est réalisée par l'entreprise GCC (photo 13).

### Le béton projeté fibre polypropylène

Pour éviter la perforation de l'étanchéité lors de sa mise en œuvre sur le support, une couche de 3 cm de béton non fibré a été projetée pour recouvrir les fibres métalliques. En cours de travaux, des essais ont validé l'utilisation de fibres polypropylène pour remplacer les fibres métalliques et ainsi éviter la mise en œuvre de la couche de béton projeté non fibré de protection. Les 30 kg de fibres métalliques par mètre cube de béton sont remplacés par 7 kg de fibres polypropylène. Cette disposition permet d'obtenir un béton projeté fibré aux caractéristiques équivalentes.

### Le contrôle du profil avant la pose de l'étanchéité

La pose de ce complexe est réalisée après le contrôle du gabarit du tunnel excavé. Ce contrôle est réalisé dans un premier temps à l'aide d'un scanner 3D qui « photographie » le tunnel en trois dimensions. Les sous-profils sont ainsi détectés à l'écran grâce à des profils espacés de quelques centimètres. Le traitement des sous-profils peut ainsi être organisé bien avant l'arrivée du gabarit de contrôle physique monté sur un portique.

### La voûte béton

Le béton de revêtement est un béton C25/30 dosé à 280 kg de ciment et 50 kg de cendre par mètre cube, ceci pour limiter la montée en température dans les premières heures qui suivent sa mise en œuvre. Sa maniabilité a été réglée sur 3 h pour tenir compte des temps de transport. Quant à la résistance minimum à atteindre pour décoffrer, elle est fixée à 8 MPa.

Le béton de revêtement est réalisé à l'aide d'un coffrage marchant précontraint long de 12,5 m, pesant environ 150 t, équipé de 44 vibreurs électriques et d'un distributeur de béton. L'outil défini par Bouygues TP a été conçu et fabriqué par Ducrocq Industries.

Il avance sur quatre « pieds marchant » équipés de vérins hydrauliques à la vitesse de 12,5 m en 30 minutes. Le système de « pieds marchant » évite l'usage des rails et le risque de glissement induit par la pente de 4,71 %.

Les volumes des plots de voûtes varient entre 110 m<sup>3</sup> et 300 m<sup>3</sup> totalisant 22000 m<sup>3</sup> de béton.

La capacité de la pompe à béton électrique est égale à 50 m<sup>3</sup>/h. L'utilisation d'une pompe sur camion n'a pas été retenue à cause des caniveaux latéraux creusés pour recevoir les conduites de drainage qui réduisent à 5 m la largeur de la chaussée circulaire en phase travaux.

Le bétonnage est assuré depuis les centrales du réseau Béton Rhône Alpes d'Auberives (à 35 minutes) et de Saint-Marcellin (à 45 minutes) par la tête aval à l'aide



Photo 15

Coffrage voûte tête aval

Arch formwork at the downstream portal

de sept à huit toupies en rotation. Les travaux de bétonnage de la voûte ont été lancés après 1 100 m de creusement. Dans un premier temps, la voûte est réalisée à une cadence d'un plot tous les deux jours avant de passer à un plot par jour après le percement (photos 14 et 15).

### La chaussée

Le chantier a fait appel à la société Agilis pour réaliser les bordures de trottoirs avec un coffrage glissant.

La chaussée est de conception classique. Elle est réalisée par Colas. Les produits d'excavation du tunnel sont réutilisés après concassage par Colas pour réaliser la première couche de grave 0-30 non traitée (épaisseur comprise entre 10 et 20 cm). Une couche de grave traitée de 10 cm est mise en œuvre avant les 6 cm d'enrobés.

### ■ Conclusion

Le tunnel des Grands Goulets aura été l'occasion pour Bouygues Travaux Publics et ses partenaires, de réaliser au cœur d'un site grandiose et dangereux le rêve de toute une population, un rêve porté par le Conseil général de la Drôme, maître d'ouvrage de l'opération, plus de 150 ans après la construction de la route historique des Grands Goulets.

Ce chantier aura permis également de mettre au point et d'améliorer de nombreuses techniques comme l'explosif, le béton projeté, le coffrage et le scanner 3D.

Ce chantier aura enfin été une formidable aventure humaine, une chance pour de nombreux jeunes et moins jeunes originaires de la région, de découvrir le monde des travaux publics et des travaux souterrains en particulier. ■

## ABSTRACT

### The Grands Goulets tunnel on county road RD518

R. Kabbaj

May 2005 - December 2007 : Bouygues TP is constructing the Grands Goulets tunnel on behalf of the "Conseil général" (County Council) of the Drôme region as part of work to improve safety on the Grands Goulets road. This road, on which falling blocks and rock slides sometimes occur, was cut out of the cliff side more than one hundred and fifty years ago. This vital artery links the Vercors Plateau to the Isère Valley via the Vernaison Valley, where the environment is very sensitive. The Grands Goulets tunnel is an opportunity for the personnel of Bouygues TP to apply, for the first time in France, numerous techniques in fields as diverse as emulsion explosive, the use of synthetic fibres in shotcrete, and the use of mobile tunnel formwork. It is also a sensitive site which must take into account numerous specific environmental features, stability of the cliff, protection of fauna and flora, not to mention allowance for the expectations of the population in terms of both employment but also conservation of its living environment.

## RESUMEN ESPAÑOL

### El túnel de Les Grands Goulets en la carretera departamental RD518

R. Kabbaj

Mayo de 2005 - Diciembre de 2007 : Bouygues TP ejecuta el túnel de Les Grands Goulets por cuenta de la diputación provincial del departamento de la Drôme en el marco de los trabajos de protección y seguridad de la carretera de Les Grands Goulets. Esta carretera sujeta a diversas caídas de bloques y desprendimientos fue excavada por el ladero del acantilado hace ya más de ciento cincuenta años. Este eje primordial pone en comunicación la meseta del Vercors con el valle del Isère pasando por el valle de la Vernaison, un sitio medioambiental sumamente sensible. El túnel de Les Grands Goulets constituye la ocasión para los equipos de Bouygues TP poner en aplicación, por vez primera en Francia, numerosas técnicas en sectores tan diversificados como el explosivo en emulsión, el empleo de fibras sintéticas en el hormigón proyectado, y la utilización de un encofrado túnel autodesplazable. También se trata de una obra delicada que debe tener en cuenta numerosas especificidades medioambientales, estabilidad del acantilado, preservación de la fauna y de la flora, sin olvidar la integración de las expectativas de la población simultáneamente en términos de empleo así como de respeto de su marco de vida.

# Rénovation des tunnels de de l'A40, réseau APRR

Après une phase préparatoire en 2006, APRR poursuit cette année la rénovation des tunnels de Saint-Germain et Châtillon sur l'A40, entre Nantua et Bellegarde, dans l'Ain. Ces travaux constituent le dernier volet de son programme de rénovation et de sécurisation des tunnels de l'A40 (Chamoise, Saint-Germain et Châtillon), en réponse à l'évolution de la réglementation. Représentant un investissement total de 20 millions d'euros pour les deux derniers ouvrages, le chantier s'échelonne sur 3 ans : 2006, 2007 et 2008.

## ■ Une réponse à l'évolution de la réglementation

Au cours de ces dernières années, la réglementation en matière de sécurité des tunnels a considérablement évolué. Dès le 25 août 2000, une circulaire interministérielle avait permis de mettre en place de nouvelles procédures et de fixer des règles techniques modernisées, mais elle n'était applicable qu'aux tunnels sur route nationale ou autoroute. Cette circulaire, remplacée depuis le 29 mars 2006 (à l'exception de l'instruction technique), a fixé de nouvelles règles, à la base de la directive européenne de 2004. Ce sont ces évolutions qui sont à l'origine du programme de mise à niveau en France de l'ensemble des tunnels routiers de plus de 300 m (photo 1).

Photo 1

Les deux tubes du tunnel de Châtillon  
*The twin-tube of Châtillon tunnel*

## ■ Un programme global de rénovation et de sécurisation des tunnels de l'A40

Au regard de ces nouveaux impératifs réglementaires, APRR a initié à l'été 2003 un programme global de rénovation et de sécurisation des trois tunnels de l'A40 (Chamoise, Saint-Germain et Châtillon). Les travaux ont débuté avec Chamoise qui constituait l'ouvrage le plus long (3300 m) et nécessitait par conséquent des travaux plus lourds. Le chantier a été conduit entre 2003 et 2005 pour un montant de 35 millions d'euros.

Depuis l'an dernier, c'est au tour des tunnels de Saint-Germain et Châtillon d'être rénovés. Les travaux s'échelonnent en trois phases sur 2006, 2007 et 2008.

## ■ Un chantier d'envergure échelonné sur 3 ans

Les travaux sont réalisés simultanément pour Saint-Germain et Châtillon. Distants d'à peine 3 km, les deux tunnels sont en effet traités comme un seul et même ouvrage, avec des opérations quasi identiques :

- du 4 septembre au 21 novembre 2006 : travaux préparatoires;
- du 29 mai au 26 octobre 2007 : rénovation des tubes sud (sens Mâcon → Genève);
- de mai à octobre 2008 : rénovation des tubes nord (sens Genève → Mâcon).

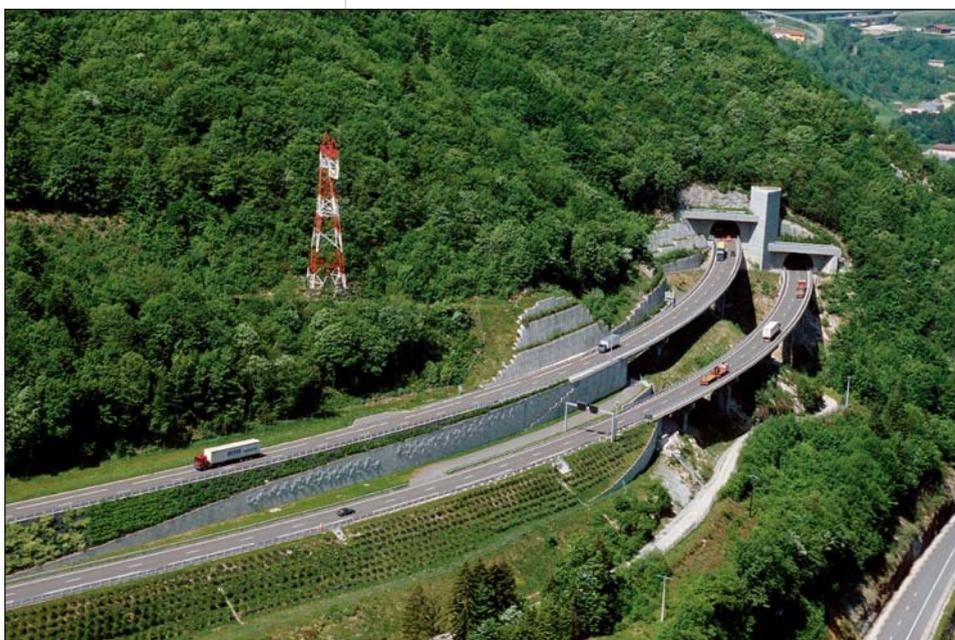
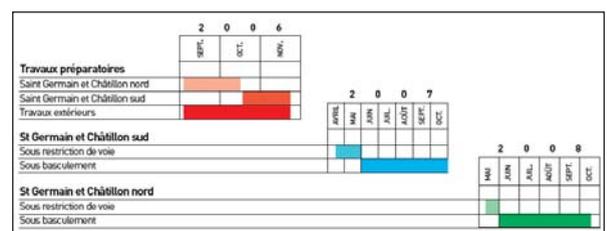
Compte tenu de la nature des travaux réalisés, les tubes en chantier nécessitent une fermeture complète. En conséquence, la circulation s'effectue à double sens dans les tubes du sens opposé.

## Un calendrier optimisé

Si les aménagements de circulation peuvent être, sur certaines périodes de fort trafic, particulièrement contraignants, les travaux ont été organisés de manière à réduire autant que possible la gêne occasionnée.

Figure 1

Calendrier du chantier 2006-2008  
*Project schedule 2006-2008*



# Saint-Germain et Châtillon



**Jean-Guy Gayet**  
Conducteur  
d'opérations,  
chef du service  
Infrastructures-  
Environnement  
APRR Rhône

Le calendrier prend ainsi en compte différents paramètres :

- en 2006, les travaux préparatoires ont été planifiés de septembre à novembre, hors périodes de congés, pour limiter l'impact sur les flux touristiques;
- sur les trois ans, le chantier est interrompu entre fin novembre 2006 et mars 2007, pour permettre le bon déroulement du service hivernal et l'accueil des vacanciers de l'hiver (figure 1).

## ■ Le programme de travaux

Après la phase préparatoire de 2006, les travaux clés se déroulent sur 2007 et 2008. Au total, 13 mois seront nécessaires pour atteindre deux objectifs majeurs :

- la rénovation globale des ouvrages, avec un volet du chantier dédié au génie civil;
- l'optimisation du niveau de sécurité, avec la mise en place de nouveaux équipements.

Au regard de ces objectifs, c'est un chantier d'envergure qui est réalisé, requérant un haut niveau d'expertise et des savoir-faire spécifiques. Pour chaque étape, jusqu'à 100 personnes sont mobilisées sur le terrain, avec un chantier actif du lundi au vendredi et parfois le samedi, de jour comme de nuit.

Dans les deux tunnels, les opérations réalisées sont quasiment identiques, les ouvrages ayant été mis en service à la même période (1989) et donc conçus de manière relativement similaire.

## La phase préparatoire réalisée en 2006

Pour réduire la durée globale de fermeture sur 2007 et 2008, des travaux préparatoires ont été conduits en 2006 :

- sécurisation des issues de secours : création de trois des six sas de sécurité prévus au niveau de ces issues de secours (accès entre les tubes appelés aussi « bypass ») : aménagement d'une rampe d'accès pour les personnes à mobilité réduite et mise en place de portes coupe-feu 2 heures;
- renforcement des équipements de lutte contre les incendies : création d'un réservoir d'eau d'une capacité de 200 m<sup>3</sup> à Saint-Germain;
- renforcement des équipements de sécurité : installation de demi-barrières aux têtes des tubes adaptées au mode de circulation bi-directionnelle;
- réaménagement des locaux techniques et création d'un nouveau local;
- amélioration du réseau de traitement des eaux : extension d'un bassin de récupération des eaux existant pour Saint-Germain et création d'un nouveau bassin pour Châtillon (photo 2).



Photo 2

Sécurisation des issues de secours : mise en place d'une porte coupe-feu

*Improving the safety of emergency exits : installation of a fire door*

## La sécurité au cœur du chantier

**Pendant les travaux, la sécurité demeure une priorité absolue. Tout comme en 2006, différentes mesures sont en place pour faire face aux conditions particulières d'exploitation des tunnels.**

**Objectifs : assurer en toutes circonstances la sécurité des conducteurs empruntant les ouvrages et des personnels travaillant sur le chantier.**

### Des règles de conduite adaptées à la circulation bi-directionnelle

Pour assurer la sécurité des conducteurs en mode bi-directionnel, les règles de circulation sont adaptées :

- la vitesse pour tous les véhicules est limitée à 70 km/h dans la zone de travaux;
- chaque conducteur doit respecter un intervalle de 2 secondes avec le véhicule qui le précède.

### Une surveillance 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7

Depuis le début des travaux, la surveillance des deux tunnels est assurée depuis le PC de Saint-Martin-du-Fresne. Ce dernier contrôle et peut activer à distance tous les équipements des ouvrages (caméras, détection d'ouverture des portes des issues de secours, réception des demandes depuis les postes d'appel d'urgence...).

En parallèle, un poste avancé d'intervention et de secours est installé entre les deux tunnels, avec la présence permanente de trois pompiers professionnels. Ce poste est mis à disposition par le Service départemental d'incendie et de secours de l'Ain (SDIS 01). Ce dispositif a été prévu pour les trois phases de chantier, pour une intervention immédiate.

### Sécurité maximale pour les équipes intervenant sur le chantier

Au cours des travaux, entre 40 et 100 personnes (selon les périodes) sont présentes sur le chantier, dans des conditions souvent difficiles. Une attention particulière est portée à leur sécurité, d'où l'élaboration dès 2006 d'un Plan général de coordination de sécurité et de protection de la santé (PGCSPS), reconduit cette année. Il rassemble différentes mesures :

- des accès prédéfinis pour les secours;
- un plan de circulation dédié;
- la présence permanente d'un coordinateur Sécurité, pour veiller au bon respect des consignes de sécurité sur le terrain;
- un contrôle systématique d'accès au chantier pour les phases 2007 et 2008.

## Rénovation des tunnels de Saint-Germain et Châtillon de l'A40, réseau APRR



Photo 3

Mise en place du réseau de collecteurs des eaux  
*Placing the water drainage network*

### ► Les travaux 2007 et 2008

Sur ces deux années qui concentrent l'essentiel des travaux, 2007 a été consacrée au chantier des tubes sud, alors que 2008 sera consacrée à la rénovation des tubes nord.

Les opérations des tubes sud, démarrées depuis le 29 mai 2007 pour une durée de 5 mois, viennent de prendre fin. Ils ont porté sur :

- le renforcement de la ventilation : l'ancienne ventilation longitudinale a été renforcée, pour une meilleure évacuation des fumées vers l'extérieur. En remplacement des 24 accé-

lérateurs anciens, 44 nouveaux accélérateurs au total seront mis en place, fixés directement dans la voûte en béton armé, par groupes de 2. Pour la phase 2007, la dépose des anciens accélérateurs a été suivie de l'installation de 10 nouveaux équipements à Châtillon et de 18 à Saint-Germain, à l'exception de ceux utilisés pour assurer la ventilation du chantier;

- l'installation des réseaux : une tranchée multi-alvéolaire a été enfouie sous les trottoirs, pour protéger les différents réseaux contre les incendies. Y ont été placés les réseaux humides (assainissement, drainage et conduite incendie) et les réseaux secs (électricité, fibre optique, Gestion technique centralisée...). Notons dans ce cadre que l'alimentation électrique a été entièrement refaite, avec un dispositif de basculement vers un réseau de secours en cas de panne (photos 3 et 4);
- la création de niches incendie complémentaires : passage de quatre à sept niches par sens pour Saint-Germain et de trois à cinq niches par sens pour Châtillon, réalisées au courant de l'été 2007 dans les tubes sud et seront réalisées en 2008 dans les tubes nord;
- la poursuite de l'amélioration du traitement des eaux : en complément des opérations conduites sur les bassins extérieurs, le réseau existant est amélioré. Un caniveau à fente est mis en place, se déversant dans des regards siphoniques pour éviter la propagation d'un éventuel incendie. Les eaux sales issues du tunnel (eaux de lavage du tunnel, produits déversés accidentellement sur la chaussée, eaux entraînées par les véhicules aux deux extrémités du tunnel...) seront collectées dans ce caniveau, avant d'être évacuées pour traitement via les bassins extérieurs (photo 5).
- le renforcement de la signalisation : après les travaux de signalisation d'approche déjà réalisés, le chantier prévoit la mise en place :
  - > de panneaux à messages variables,
  - > d'une signalétique et panneaux à messages préprogrammés (PMP) au niveau des issues de secours,
  - > des panneaux de police,
  - > des plots de jalonnement...
 Ces équipements seront installés en toute fin de chantier;
- la rénovation des portes des postes de secours : placés tous les 200 m et comprenant une borne d'appel d'urgence et des extincteurs;
- la rénovation de l'éclairage : les deux rampes d'éclairage sont remplacées par une rampe unique permettant une variation de tous les luminaires, adaptables en fonction des conditions de luminosité extérieure. Placée au-dessus de la voie rapide pour faciliter les interventions de maintenance sans gêne au trafic,

Photo 4  
Coulage de béton en tranchée multi-alvéolaire  
*Pouring concrete in multi-cellular trenches*

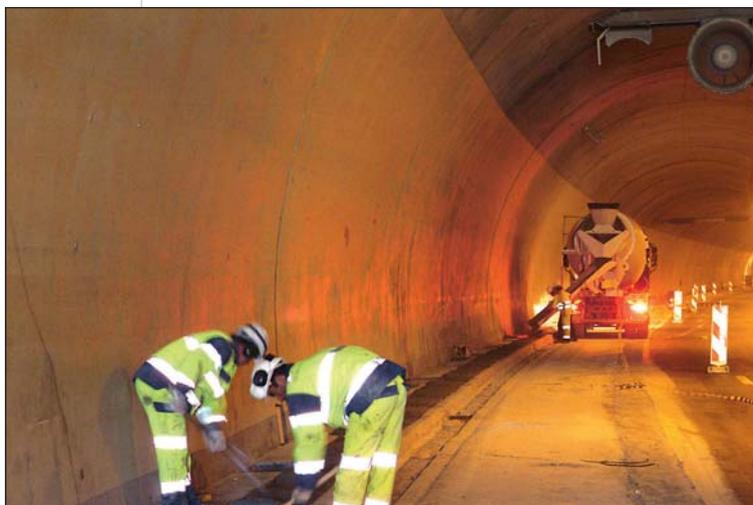


Photo 5  
Creusement des caniveaux  
*Excavation of gutters*





Photo 6

Les deux rampes d'éclairage sont remplacées par une rampe unique

*The two strip lights are replaced by a single strip*

cette nouvelle rampe a pour autre avantage de renforcer les performances de la Détection automatique d'incidents (DAI), grâce aux conditions de visibilité accrues (photo 6);

- l'adaptation de la Gestion technique centralisée : celle-ci assure le contrôle à distance de tous les équipements du tunnel. Elle fait l'objet de reconfigurations successives, pour intégrer au fur et à mesure de leur installation tous les nouveaux équipements;
- la réfection des chaussées, avec la pose d'un nouvel enrobé, prévue en fin de chantier.

À noter par ailleurs que la Détection automatique d'incidents (DAI) a déjà été entièrement reconfigurée dans les deux tunnels en 2004 et 2005, en même temps que pour le tunnel de Chamoise. Son principe repose sur un programme informatique, qui analyse automatiquement les images issues des caméras de vidéosurveillance. Toute anomalie (ex : une voiture à l'arrêt) génère une alerte au poste de commandement (PC) de Saint-Martin-du-Fresne. ■

#### LES ENTREPRISES MOBILISÉES

**Maitrise d'œuvre**  
Ingérop

**Mission coordination sécurité**  
Alpes Contrôles

### ABSTRACT *Renovation of the Saint-Germain and Châtillon tunnels on the A40, APRR network*

J.-G. Gayet

*Following the recent changes in the regulations regarding road tunnel safety, the Autoroutes Paris Rhin-Rhône (APRR) motorway concession operator has undertaken a renovation programme over three years, to bring the Chamoise, Saint-Germain and Châtillon tunnels on the A40 motorway into line with the new standards.*

*The works described in this article represent the final part of this programme to renovate and improve the safety of the Saint-Germain and Châtillon tunnels, between Nantua and Bellegarde, in the Ain region.*

### RESUMEN ESPAÑOL *Renovación de los túneles de Saint-Germain y Châtillon en la autopista A40, red APRR*

J.-G. Gayet

*Como consecuencia de las recientes evoluciones de la normativa en el aspecto de la seguridad de los túneles viales, la empresa de Autopistas París Rín-Ródano (APRR) está llevando a cabo un programa de renovación en 3 años, para la puesta según las nuevas normas de los túneles de Chamoise, Saint-Germain y Châtillon en la autopista A40.*

*Los trabajos que figuran descritos en el presente artículo constituyen el último capítulo de este programa de rehabilitación y de puesta en seguridad de los túneles de Saint-Germain y Châtillon, entre Nantua y Bellegarde, en el departamento del Ain.*

# Instrumentation et surveillance impactées par les travaux de dirigé

L'instrumentation des voies de chemin de fer, par le biais de la mesure d'élongation d'un système de cordes optiques solidaires des voies au droit d'un fonçage, forage dirigé ou microtunnelage sous les voies ferrées, permet de rendre compte de son impact sur leur stabilité. Le système de mesure mis au point par Geoscan au moyen des cordes optiques Osmos permet d'effectuer une surveillance en continu de la « vie » des voies et plates-formes ferroviaires pendant les travaux de creusement. Elle rend compte automatiquement des anomalies de comportement sans qu'une surveillance sur le site ne soit nécessaire, en générant des alertes programmées au service d'astreinte pour suite à donner, lever visuel ou topographique, action préventive de mise en sécurité des voies.

À la requête de la SNCF, la société Geoscan a effectué une instrumentation de la voie Pétrole de la gare de Fos-Coussoul, au moyen d'un couple de cordes optiques Osmos solidaires à la voie, à l'axe de fonçage d'un pipeline DN450. L'objectif de l'instrumentation était de surveiller l'impact des désordres occasionnés par une fuite d'eau sur la stabilité de la plate-forme, en particulier sous la voie, tels que des déformations de la voie et tassements différentiels éventuellement induits sous l'effet des charges dynamiques générées par les convois SNCF et sous l'effet de la poursuite du fonçage et des travaux d'injections projetés.

Photos 1 et 2  
Station de monitoring  
Monitoring station

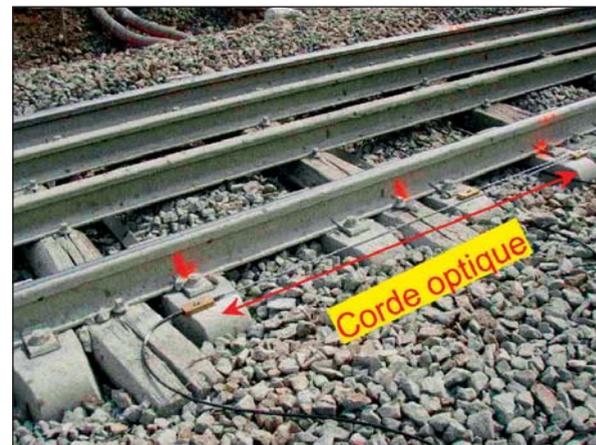
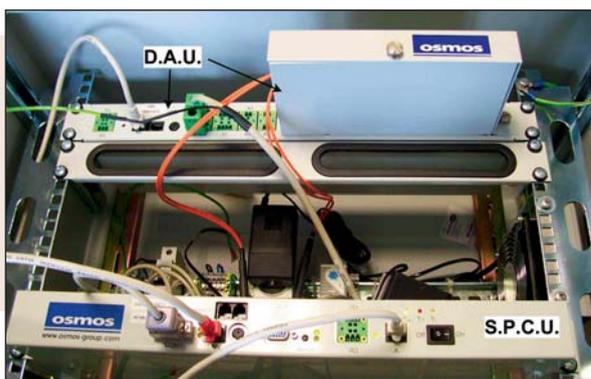


Photo 3  
Deux cordes optiques de 2 m avec 30 m de câble chacune  
Two 2-metre optical cords with 30 m of cable each

Le système permet :

- de mettre en sécurité l'ensemble de la voie, permettant ainsi d'alléger le dispositif de surveillance topographique;
- de réduire le dispositif de surveillance d'astreinte mis en place par la SNCF;
- d'autoriser la continuité du trafic ferroviaire;
- d'assurer le suivi en temps réel de « la vie » de la voie et de sa plate-forme d'assise, avec mise en alerte immédiate en cas d'anomalie de comportement suspect.

Les cordes optiques et le matériel de mesure étaient fournis par la société Osmos, développeur et fabricant, en partenariat avec Geoscan chargé de la mise en œuvre du traitement des données et de leur interprétation ainsi que du suivi d'astreinte.

## ■ Système de surveillance et mise en œuvre (photos 1, 2, 3 et 4)

L'équipement mis en place pour la surveillance est composé d'une station de monitoring constituée d'un SPCU (unité de traitement et de communication des signaux) et d'un DAU (unité d'acquisition des données). Cette unité d'acquisition est installée à proximité des voies, dans les bureaux SNCF. Elle est reliée à une alimentation électrique de 220 volts, et aux capteurs de déformation (deux cordes optiques flexibles gainées d'acier de 2 m), et à un capteur de cause constitué d'une sonde de mesure de température. Cette dernière permet de corréliser les variations de température avec une éventuelle dérive des mesures liée à la dilatation-rétraction des rails.

La station est par ailleurs équipée d'un modem GSM de communication dont la fonction est de gérer et

# permanente des voies ferrées fonçage microtunnelier et forage

René Foillard  
Directeur d'agence  
Geoscan Sud-Est

d'envoyer des messages d'alerte 24 heures sur 24 à l'équipe de surveillance Geoscan en cas d'anomalie de comportement de la mesure et de la déformation anormale des cordes. Ce dispositif permet son interrogation à distance, le suivi, le contrôle des mesures et le téléchargement des mesures acquises.

Tous les capteurs sont reliés à la station de monitoring par des câbles de liaison à fibre optique pour les cordes et analogique pour le capteur de température. Ces câbles de liaison ont été passés sous les voies et tirés jusqu'au premier étage du bâtiment SNCF où était installée la station de monitoring.

## ■ Méthodologie de la mesure

Afin de répondre à l'objectif assigné, en l'occurrence la surveillance en temps réel des seules anomalies de déformation de l'ensemble mécaniquement cohérent constitué par la voie de chemin de fer (traverses-rails) vis-à-vis de son support que constitue la plate-forme ferroviaire, la méthodologie de mesure répond à deux impératifs techniques impliquant la géométrie du dispositif, le mode d'échantillonnage et d'analyse de la variation d'élongation des couples de cordes optiques installées.

## La géométrie du dispositif

Le dispositif de cordes optiques est installé sur la ou les voie(s) au niveau des traverses (photo 5). Il est choisi en fonction de la géométrie de la voie (courbure, aiguillage, présence de raidisseurs, etc.), du type de traverses (bois, béton) et de façon à :

Photo 4

Une sonde de température avec 10 m de câble  
A temperature sensor with 10 m of cable

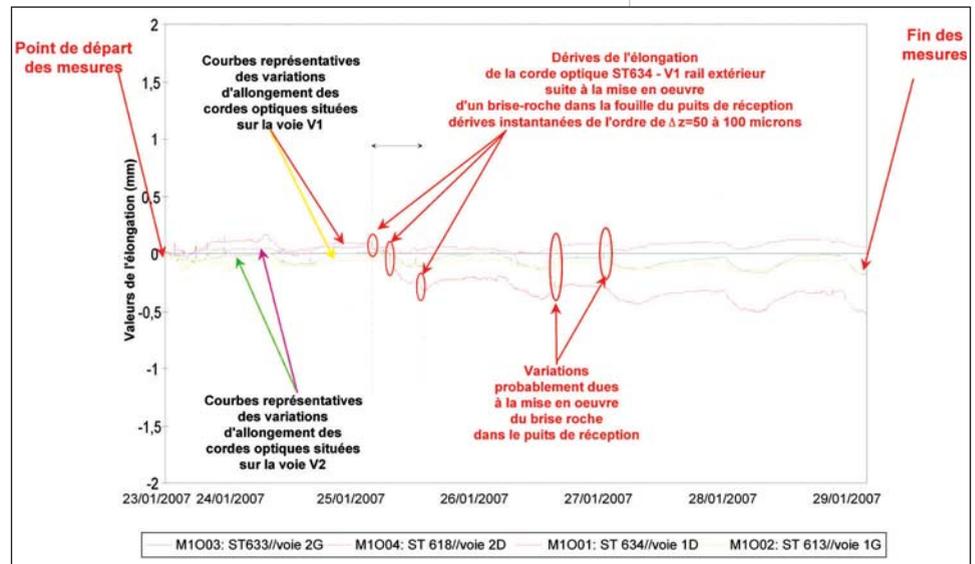


Figure 1

Analyse de la variation d'élongation  
Analysis of the elongation variation

- rendre compte des « mouvements » ou déformations de l'ensemble représentatif de la voie sous l'effet du fonçage, et en particulier au niveau de son axe;
- minimiser l'impact des effets de dilatation/rétraction de la portion de voie équipée sous l'effet de la température et des réajustements des contraintes thermiques subies sous l'effet dynamique du passage des charges circulantes.

Les couples de cordes optiques ont donc été disposés de part et d'autre de l'axe du fonçage avec un point d'ancrage commun généralement situé à l'axe du fonçage et deux points d'ancrage éloignés permettant d'être sensibles aux déformations longitudinales et transversales de la voie surveillée.

## Analyse de la variation d'élongation

L'analyse de la variation d'élongation s'effectue en éliminant la valeur des mesures de déformations dynamiques au seul passage des convois et en calculant la valeur résiduelle d'élongation des cordes optiques avant et après le passage des convois (mesures statiques). En effet, cette procédure permet entre autres de comparer directement la valeur de la vraie déformation cohésive voie/plate-forme sous l'effet des contraintes mécaniques dynamiques des convois et d'apprécier le retour de l'ensemble à son état d'équilibre (figure 1).

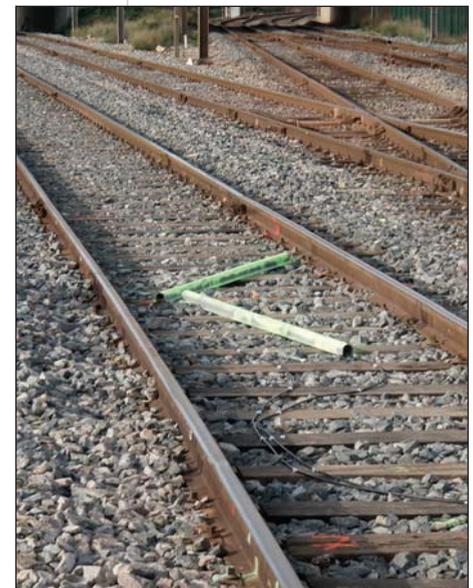


Photo 5

Le dispositif de cordes optiques est installé sur la voie ferrée  
The optical cords system is installed on the railway line

### Instrumentation et surveillance permanente des voies ferrées impactées par les travaux de fonçage microtunnelier et forage dirigé

Des seuils de détection des anomalies de comportement de la voie sont choisis et appliqués à ces mesures statiques avec :

- un seuil de valeurs anormales d'élongation, avant et après contrainte dynamique, fixé à la moitié de l'amplitude de la déformation générée par le passage d'un convoi de moyenne importance;
- un seuil de valeurs anormales d'élongation instantanée fixé, appliqué à la mesure de deux valeurs de mesures statiques successives.

Les seuils de déclenchements des alarmes ainsi fixés permettent préventivement, de signaler toute anomalie de comportement de l'ensemble voie/plate-forme ferroviaire et de gérer les actions à entreprendre telles que l'alerte des gestionnaires, la vérification visuelle rapprochée des voies, les mesures topographiques complémentaires des voies et le ralentissement des convois. ■

#### **ABSTRACT** *Instrumentation and constant monitoring of railway tracks impacted by microtunneller boring and directional drilling work*

R. Foillard

*Instrumentation of railway tracks, by measuring the elongation of a system of optical cords integral with the tracks at the level of a driving, directional drilling or microtunnelling operation under the railway lines, enables its impact on their stability to be determined. The measuring system developed by Geoscan using Osmos optical cords allows the "life" of railway tracks and subgrades to be monitored continuously during the digging work. It automatically reports behavioural problems without requiring monitoring on site, by generating programmed warnings to the emergency standby department concerning action to be taken, a visual or topographic survey, or preventive action to establish safe conditions on the tracks.*

#### **RESUMEN ESPAÑOL** *Instrumentación y vigilancia permanente de las vías férreas cuyos impactos se derivan de los trabajos de excavación horizontal por microtuneladora y perforación intencionalmente desviada*

R. Foillard

*La instrumentación de las vías de ferrocarril, por medio de la medición de elongación de un sistema de cuerdas ópticas solidarias de las vías a la altura de una excavación horizontal, perforación intencionalmente desviada o microtuneladora bajo las vías férreas, permite elaborar un informe relativo a su impacto acerca de su estabilidad. El sistema de medición elaborado por Geoscan mediante cuerdas ópticas Osmos permite efectuar una vigilancia en continuo de la "vida" de las vías y plataformas ferroviarias durante los trabajos de excavación. Esta supervisión informa automáticamente las anomalías de comportamiento sin que sea necesaria una vigilancia en el emplazamiento, al generar diversas alertas programadas al servicio de turno para dar cumplimiento, operación visual o topográfica, acción preventiva o puesta en protección de las vías.*

# La démarche française pour améliorer les chantiers d'installation de canalisations : les chartes de qualité

**René-Claude Fouilloux**  
Ingénieur à l'Agence de l'Eau Seine-Normandie  
Chef de projet à l'ASTEE et à la FSTT

**Jean-François Maregiano**  
Consultant - JFM Conseils (France)  
Membre de l'ASTEE et de la FSTT

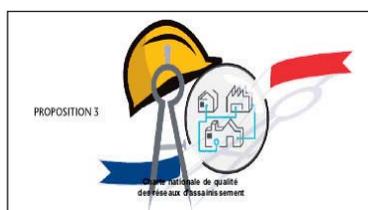
**Afin d'améliorer la qualité des chantiers d'installation de canalisations d'assainissement, les autorités françaises et notamment les Agences de l'Eau françaises ont créé un comité avec tous les intervenants : Agences de l'Eau, propriétaires des réseaux, ingénieurs-conseils, entreprises, organismes de contrôle qualité et fournisseurs de canalisations.**

**Un document synoptique appelé « charte de qualité » présente une philosophie générale de gestion de projet dans laquelle les responsabilités de chacun sont bien définies.**

**Toutes les parties s'accordent sur :**

- la réalisation des études préliminaires nécessaires;
- la vérification de toutes les solutions techniques possibles;
- le choix de tous les intervenants selon le principe du « mieux disant »;
- le temps nécessaire pour préparer le travail;
- la mise en œuvre d'une démarche qualité à chaque niveau;
- le contrôle-suivi continu et permanent de chaque étape.

**Les chartes de qualité ont montré leur efficacité et sont de plus en plus adoptées en France.**



Les Agences de l'Eau sont les acteurs principaux dans le financement des travaux d'assainissements en France. Elles ont été créées à la fin des années soixante pour coordonner les programmes d'investissement dans l'assainissement, dans les stations de traitement de l'eau et plus généralement pour assurer la qualité de l'eau. Elles sont financées par une taxe prélevée en fonction de la consommation d'eau. Le produit de cette taxe est réinvesti dans les villes sous forme de subventions ou de prêts à taux zéro. L'intérêt principal des Agences de l'Eau est qu'elles peuvent aider les petites villes à financer leurs projets d'assainissement.

D'autres partenaires peuvent fournir des subventions, tels le Conseil général (l'équivalent du « county » en Angleterre) ou le Conseil régional (l'équivalent du « Land » en Allemagne). Les villes peuvent obtenir

des subventions qui peuvent atteindre 80 % du montant des investissements (hors TVA).

Après de nombreuses années où seuls des contrôles légers ont été réalisés, les Agences de l'Eau se sont aperçues qu'elles finançaient déjà la réhabilitation d'ouvrages qui avaient été achevés seulement vingt ou trente ans auparavant. Parfois, la durée de vie utile prévue pour ces ouvrages n'était pas encore terminée et parfois même les ouvrages n'avaient pas été remboursés intégralement.

Elles se sont donc interrogées sur le pourquoi de cette situation et comment la corriger.

## ■ Les causes principales de dysfonctionnements

On a confié à un groupe de travail, composé de propriétaires de réseaux, de maîtres d'œuvre, d'entreprises de travaux et de fournisseurs, la mission de réfléchir à ce problème et de proposer des solutions.

Voici les principales sources de dysfonctionnements qui sont apparus :

- instabilité du sol à cause d'un compactage insuffisant des remblais recouvrant les canalisations;
- infiltration d'eau en provenance du sol;
- infiltration de l'eau de pluie en provenance des habitations ou des routes.

Mais les origines de ces dysfonctionnements étaient moins faciles de déceler.

Selon les fournisseurs, les matériels vendus sont produits selon les normes en vigueur et tout est contrôlé à chaque étape de la production. Ils n'étaient donc pas responsables de cette situation, le tord revenant aux entreprises qui utilisent mal les matériels fournis.

Selon les entreprises, le travail est réalisé dans les règles de l'art. Les problèmes viennent des aléas qui surviennent au moment de la réalisation des travaux : une nappe phréatique élevée, de mauvais sols et d'autres réseaux se trouvant dans les tranchées...

Mais elles rapportent surtout que, même si elles entrevoyaient un problème au stade du devis, elles pouvaient difficilement le prendre en compte si elles voulaient bien se placer pour avoir une chance de remporter le contrat.

La faute revenait donc au maître d'œuvre qui effectuait une étude sommaire et faisait l'impasse sur ces problèmes.

Selon les maîtres d'œuvre, les maîtres d'ouvrage écartaient toujours les prix trop élevés et refusaient de payer des études complémentaires. Ainsi, ils étaient obligés de proposer de petits budgets. Les maîtres d'ouvrage étaient donc responsables puisqu'ils recherchaient systématiquement les prix les plus bas, même si ce n'était pas réaliste.

## La démarche française pour améliorer les chantiers d'installation de canalisations : les chartes de qualité



Enfin, selon les maîtres d'ouvrage, ils n'ont pas été informés par les autres intervenants de la nécessité de réaliser des travaux plus complexes. Lors de la phase de négociation, tout semblait simple. Une fois le contrat signé, de nombreuses difficultés sont apparues avec les coûts supplémentaires que cela comporte.

Dans les faits, tous ces éléments jouent un rôle et il ne s'agit pas de pointer du doigt tel ou tel mais bien de proposer des solutions.

C'est pourquoi les « chartes qualité » ont été créées.

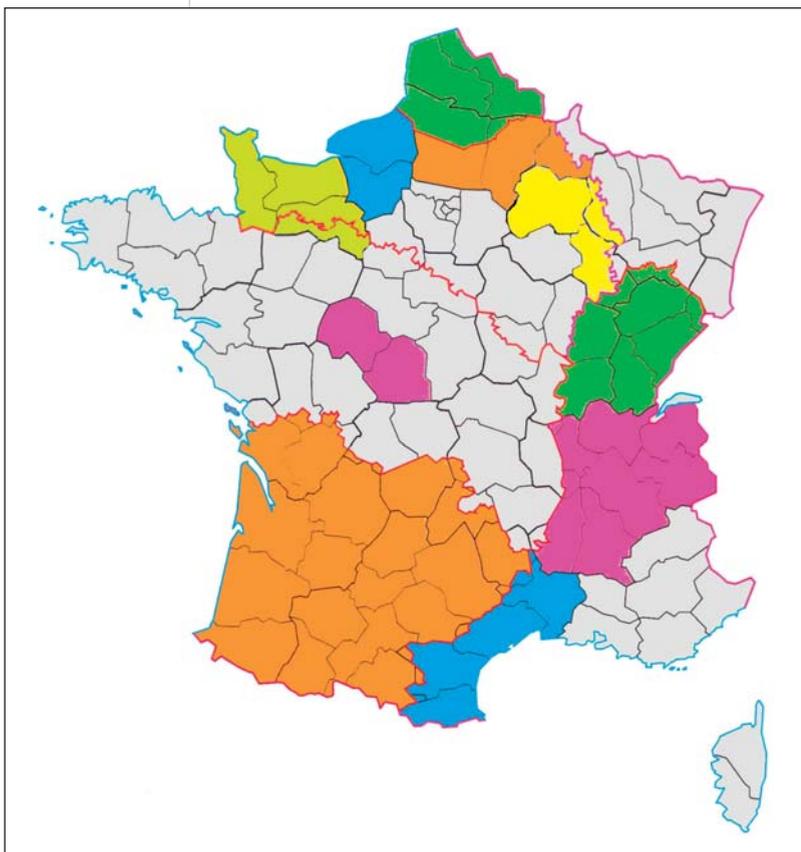


Figure 2

Départements couverts par une charte régionale.

Du nord au sud chartes : Artois-Picardie ; Haute-Normandie - Basse-Normandie ; Aisne - Ardennes - Oise ; Marne - Meuse - Haute-Marne ; Indre - Indre-et-Loire ; Franche-Comté ; Rhône-Alpes ; Adour-Garonne ; Languedoc-Roussillon

"Départements" covered by a regional charter.

From North to South : Charters of Artois-Picardie ; Haute-Normandie, Basse-Normandie ; Aisne, Ardennes, Oise ; Marne, Meuse, Haute-Marne ; Indre, Indre-et-Loire ; Franche-Comté ; Rhône-Alpes ; Adour-Garonne and Languedoc-Roussillon

### ■ Les principes de la charte

Les principes de la charte sont simples. Ils sont basés sur la volonté des Agences de l'Eau de faire de bons investissements à long terme. Ainsi, elles préfèrent financer un projet qui semble plus coûteux si elles peuvent s'attendre à une meilleure durabilité des canalisations installées.

### Tout d'abord un contrôle après la réalisation du travail est indispensable

Ce contrôle est réalisé selon les règlements européens et comporte :

- un essai de pression selon la norme EN 1610. Cet essai est réalisé sur toute la longueur des canalisations et des canalisations de branchement. Il concerne également les regards de visite et de branchement ;
- un essai de compactage selon la norme NFP 98-331. Celui-ci est entrepris pour chaque tronçon situé entre deux regards de visite et pour un regard de branchement sur quatre ;
- un contrôle de toute la canalisation ainsi que des canalisations de branchement par télévision en circuit fermé.

Tous les essais doivent être satisfaisants ; dans le cas contraire, des justifications doivent être fournies aux Agences de l'Eau. Si un essai ne donne pas satisfaction et qu'aucun remède n'est apporté, des subventions ou prêts ne seront pas accordés aux maîtres d'ouvrage, donc aux entreprises de travaux. Cette approche rigoureuse donne de bons résultats, comme nous le verrons ci-après.

Dans la mesure du possible, en fin des travaux, une réunion sera organisée pour faire un bilan de tous les problèmes rencontrés et des solutions apportées, et pour un échange d'expériences entre les acteurs.

### En deuxième lieu, des études approfondies dans la phase de conception

Afin d'améliorer la conception du projet, des études préliminaires doivent être réalisées.

Selon la réglementation française, les maîtres d'œuvre doivent faire certaines enquêtes préliminaires habituelles telles que :

- la recherche d'autres réseaux en s'informant auprès de tous les maîtres d'ouvrage. Comme dans de nombreux pays, les réseaux en France ne sont pas toujours indiqués avec précision sur les cartes et une enquête sur le chantier peut permettre de confirmer leur localisation exacte ;

- des vérifications administratives concernant la conformité du projet au SDA (Schéma directeur d'assainissement);

Les études supplémentaires qui doivent être réalisées comportent au moins :

- une étude géologique de niveau 1. Cette étude comporte un classement des sols selon la réglementation française, la mesure de la nappe d'eau souterraine et une proposition pour le réemploi, si possible, du sol en place comme remblai;
- une enquête sur les parcelles privées afin d'établir comment les réseaux sont organisés sur la propriété privée. Les points prévus sont la bonne localisation des canalisations de branchement et la mesure du risque de mélange entre les eaux usées et les eaux de pluie en cas de réseaux séparatifs.

Selon les résultats de ces études préliminaires, d'autres études peuvent être demandées, par exemple :

- une étude géologique de niveau 2 ou 3. Celle-ci doit déterminer des adaptations spécifiques des travaux afin de prendre en compte des difficultés liées à la nappe d'eau ou aux mauvaises conditions de sol, ainsi que des solutions spécifiques de compactage des remblais dans le cas de réemploi des déblais.

### En troisième lieu, le choix du mieux disant et non pas du moins disant

Tous les acteurs conviennent du fait que si le prix est le seul critère de l'appel d'offres, il sera difficile de demander un niveau de qualité élevé.

Afin de bien préciser que les maîtres d'ouvrage veulent des travaux de haute qualité et non pas simplement des travaux à bas prix, l'appel d'offres indique que le travail sera réalisé selon les procédures de la charte de qualité.

Il semble en effet, qu'un prix bas sera plus souvent associé à un travail de basse qualité. Une économie de quelques centaines d'euros peut signifier une durée de vie plus courte ou des intrusions d'eau plus fréquentes. Mais surtout, un prix bas entraîne souvent des réclamations à l'achèvement des travaux. Afin de minimiser ce risque nous voulons que les entreprises réalisent une étude approfondie des travaux et présentent des solutions aux éventuels problèmes.

Selon la réglementation française, une notice technique spécifique à la tâche concernée est demandée aux entreprises. Celle-ci doit comporter les informations suivantes :

- planning général comprenant la préparation des travaux et un délai pour les contrôles;
- planification spécifique;
- une description précise de la façon dont les problèmes particuliers seront résolus, par exemple le pompage de l'eau souterraine;

- une approche de développement durable pour des actions plus respectueuses de l'environnement, telles que le réemploi des déblais;
- procédures internes de contrôle qualité.

Chaque élément a une pondération spécifique comme indiqué dans l'appel d'offres.

La part du prix dans la pondération est inférieure à 50 %.

### Enfin, contrôles continus réalisés en collaboration avec les entreprises

En France, nous contrôlons les travaux réalisés conformément aux recommandations européennes. Ainsi, nous réalisons les trois contrôles classiques pour les canalisations :

- essai de pression;
- contrôle visuel ou télévisuel de la canalisation;
- compactage du sol autour de la canalisation.

Ces contrôles doivent être réalisés par un organisme extérieur et seront à la charge du maître d'ouvrage.

Ils sont en général réalisés en une fois à la fin des travaux. Ceci signifie que si les essais sont insatisfaisants, l'entreprise doit revenir pour remédier au problème. Cela n'est pas toujours facile, il nécessite de nombreuses discussions et il fait perdre du temps.

Afin de prévenir les problèmes, nous demandons aux entreprises d'effectuer des contrôles en continu pendant l'exécution des travaux, de type auto-contrôle interne. Ainsi, les défauts peuvent être corrigés facilement alors que l'entreprise se trouve sur le chantier. C'est moins cher pour l'entreprise et cela prend moins de temps pour le maître d'œuvre.

Les essais extérieurs sont réalisés en deux phases :

- d'abord un essai sur échantillon après la réalisation du premier ou des deux premiers tronçons. Cet essai sur échantillon a pour objet de sensibiliser le conducteur de travaux sur la qualité que nous exigeons à la fin des travaux. Il vise également à valider des procédés spécifiques, et notamment les résultats de compactage lorsque nous réutilisons le sol en place;
- la deuxième phase a lieu à la fin de chaque phase principale (dès qu'une rue a été terminée, par exemple, ou dès que dix ou douze tronçons ont été réalisés).

### ■ Mesure de l'efficacité des chartes

Après quelques années, une forte opposition s'est développée à l'emploi des chartes.

Le système a été critiqué à cause des surcoûts générés par les études préliminaires et par les contrôles. Afin de bien cerner l'impact de cette procédure sur les

### La démarche française pour améliorer les chantiers d'installation de canalisations : les chartes de qualité



Photo 1

Les quatre signataires de la charte nationale lors de la cérémonie de signature avec de gauche à droite : le directeur de l'eau Pascal Bertaud, le président de l'Astee Pierre Roussel, le président de la FNTP Patrick Bernasconi, et le vice-président de Canaliseurs de France Guy Dewonck

*The four signatories of the national charter at the signature ceremony with, from left to right : Water Manager Pascal Bertaud, Astee President Pierre Roussel, FNTP President Patrick Bernasconi and the Vice President of « Canaliseurs de France », Guy Dewonck*

coûts, une étude a été confiée à un cabinet de conseil indépendant. Les résultats sont repris ci-après.

#### **1 : Les offres sur la base d'études préliminaires sont plus chères qu'une offre traditionnelle**

Il est évident que l'ingénieur d'études tient compte des données d'études préliminaires en sa possession. L'appel d'offres est plus précis et adapté aux conditions du travail.

Les conditions spécifiques du travail sont prises en compte, de sorte que le prix du projet est un peu plus élevé.

Il est évident aussi que dès que l'on fournit aux entreprises des informations concernant les conditions du sol, celles-ci les prennent en compte. En effet, elles peuvent difficilement présenter des réclamations à ce sujet par la suite.

Comme elles doivent réaliser une enquête/rapport technique spécifique, elles repèrent les problèmes du chantier et en tiennent compte. Le prix est donc ainsi plus élevé.

#### **2 : Il y a beaucoup moins de réclamations à la fin du chantier**

La différence avec cette procédure est l'absence d'avenant de la part des entreprises. Le travail de conseil, plus efficace en amont, ayant réduit le risque d'aléas, le nombre d'avenants est moindre.

Nous trouvons également dans le rapport technique

des justificatifs pour faire valoir que les difficultés ont été prévues par l'entreprise et qu'une réclamation éventuelle est sans fondement.

#### **3 : Le coût final est proche du coût de la méthode traditionnelle**

En fin de compte, le coût définitif est très proche de celui obtenu avec les méthodes précédentes. Les difficultés ayant été prévues et les problèmes de qualité résolus au cours de la réalisation, le coût final réserve donc peu de surprises. Et cette approche est plus rassurante pour tous les acteurs.

### ■ L'avenir des chartes

Aujourd'hui, les chartes se développent sur deux axes principaux.

Elles s'étendent sur le territoire national et vers d'autres domaines comme les technologies sans tranchée.

#### **La charte nationale**

Au début, les chartes étaient le résultat d'initiatives prises au niveau régional. Il y avait les chartes « Nord - Pas de Calais », « Oise Aisne » ou « Adour Garonne ». Certaines d'entre elles sont très actives, d'autres le sont moins.

Par ailleurs, certains maîtres d'ouvrage veulent que leur chantier soit réalisé selon ces principes dans des régions où la charte n'existe pas. Afin de les aider, une charte nationale a été écrite qui reprend les grands principes qui ont été exposés ci-dessus.

Cette charte nationale est conçue en tant que guide détaillant ce que doivent faire le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre, l'entreprise ainsi que les autres intervenants à chaque stade du projet.

Cette charte a été adoptée par les principaux organismes nationaux, comme les Agences de l'Eau, le syndicat des maîtres d'œuvre (Syntec), la Fédération nationale des Travaux publics (FNTP) ainsi que le syndicat des canaliseurs, les principaux fabricants de canalisations, le Comité Français d'Accréditation (Cofraq) et de nombreux autres intervenants dans le domaine de l'installation de canalisations.

#### **L'adaptation aux technologies sans tranchée**

Les chartes nationales ont été créées à l'origine, il y a quinze ans, pour l'installation de canalisations d'assainissement. À cette époque, les technologies sans tranchée ne s'étaient pas développées en France.

Aujourd'hui, la réhabilitation sans tranchée s'est forte-

ment développée et la FSTT essaie d'expliquer aux maîtres d'ouvrage et aux bailleurs de fonds les avantages de nos technologies et la façon d'adapter les études préliminaires et le contrôle de la réalisation.

Par exemple, les chantiers de réhabilitation nécessitent un contrôle visuel sérieux. Ces divers contrôles sont l'adaptation française des contrôles européens pour chaque technologie que nous pouvons employer. Le problème posé par cette évolution est le nombre de technologies (chemisage, tubage, remplacement de canalisations par éclatement...) que nous pouvons employer et les études précises qui sont nécessaires pour faire le bon choix.

L'autre difficulté est le manque de connaissance des normes européennes de la part des maîtres d'ouvrage et parfois des maîtres d'œuvre. De nombreuses normes n'ont pas été transposées dans les lois françaises et n'ont même pas été traduites en français.

## ■ Conclusion

La charte de qualité est un outil qui a été créé par une équipe de partenaires comportant des propriétaires de réseaux, des maîtres d'œuvre, des entreprises, des fournisseurs et contrôleurs de canalisations. Cet outil permet à chacun des acteurs de savoir ce qu'il doit faire à chaque stade de la conception ou de la réalisation de l'installation de canalisations neuves. Cette procédure doit être mise en œuvre par tous les intervenants dans l'installation de canalisations au niveau régional.

L'expérience prouve que, grâce à une meilleure conception et aux contrôles réalisés par les entreprises de leur propre chef :

- le taux de non-conformités relevé à la fin des travaux est bien moins élevé;
- et surtout, le budget est mieux maîtrisé et les demandes d'avenants éventuels de la part des entreprises sont bien moins recevables.

C'est pourquoi ces chartes sont en train de se développer avec l'aide des Agences de l'Eau françaises.

Ce développement se fait de deux manières principales :

- une charte nationale a été rédigée afin d'aider les maîtres d'ouvrage dans les régions où il n'existe aucune charte régionale. Cette charte nationale a été adoptée au mois de septembre 2007 par tous les principaux acteurs de l'installation de canalisations;
- de nouvelles chartes doivent voir le jour pour l'installation ou la réhabilitation de canalisations au moyen de technologies sans tranchée. Un groupe mis en place par la FSTT travaille sur ce sujet.

Puisque ces chartes sont fondées sur des principes forts et de bon sens, elles peuvent être adoptées également dans d'autres domaines tels que l'installation de canalisations sous pression ou de câbles d'énergie. ■

## ABSTRACT

### *The French approach to upgrade pipe installation projects : quality charters*

*R.-Cl. Fouilloux, J.-Fr. Maregiano*

*In order to improve the quality of sewer pipe installation projects, the French authorities, and in particular the French water agencies, have set up a committee with all the main entities involved : Water Agencies, network owners, engineering consultants, contractor companies, Quality Control organisations and pipe suppliers.*

*An overview document called the « quality charter » outlines a general project management approach in which the responsibilities of each participant are clearly defined.*

*All the parties agree on :*

- *carrying out the necessary preliminary studies;*
- *verification of all possible technical solutions;*
- *selection of all the participants according to the « best tender » principle;*
- *the time needed to prepare the work;*
- *application of a quality policy at each level;*
- *continuous, permanent inspection and monitoring of each stage.*

*Quality charters have shown their efficiency and are increasingly adopted all over France.*

## RESUMEN ESPAÑOL

### *El modelo francés para mejorar las obras de tendido de canalizaciones : las Cartas de calidad*

*R.-Cl. Fouilloux y J.-Fr. Maregiano*

*Con objeto de mejorar las obras de tendido de canalizaciones de saneamiento, las autoridades francesas y, fundamentalmente, las Agencias del Agua francesas han creado un comité que reúne a todos los participantes : Agencias del Agua, operadores de redes, ingenieros-consultores, empresas, organismos de control calidad y proveedores de canalizaciones.*

*Un documento sinóptico denominado « Carta de calidad » presenta una filosofía general de gestión de proyecto en la cual se definen claramente las responsabilidades de cada uno.*

*Todas las partes coinciden sobre :*

- *la realización de estudios preliminares necesarios;*
- *la verificación de todas las soluciones técnicas posibles;*
- *la opción de todos los participantes según el principio del « mejor postor »;*
- *el tiempo necesario para preparar el trabajo;*
- *la puesta en aplicación de un enfoque calidad en cada nivel;*
- *el control-seguimiento continuo y permanente de cada etapa.*

*Las Cartas de calidad han demostrado su eficacia y se adoptan cada vez más en Francia.*