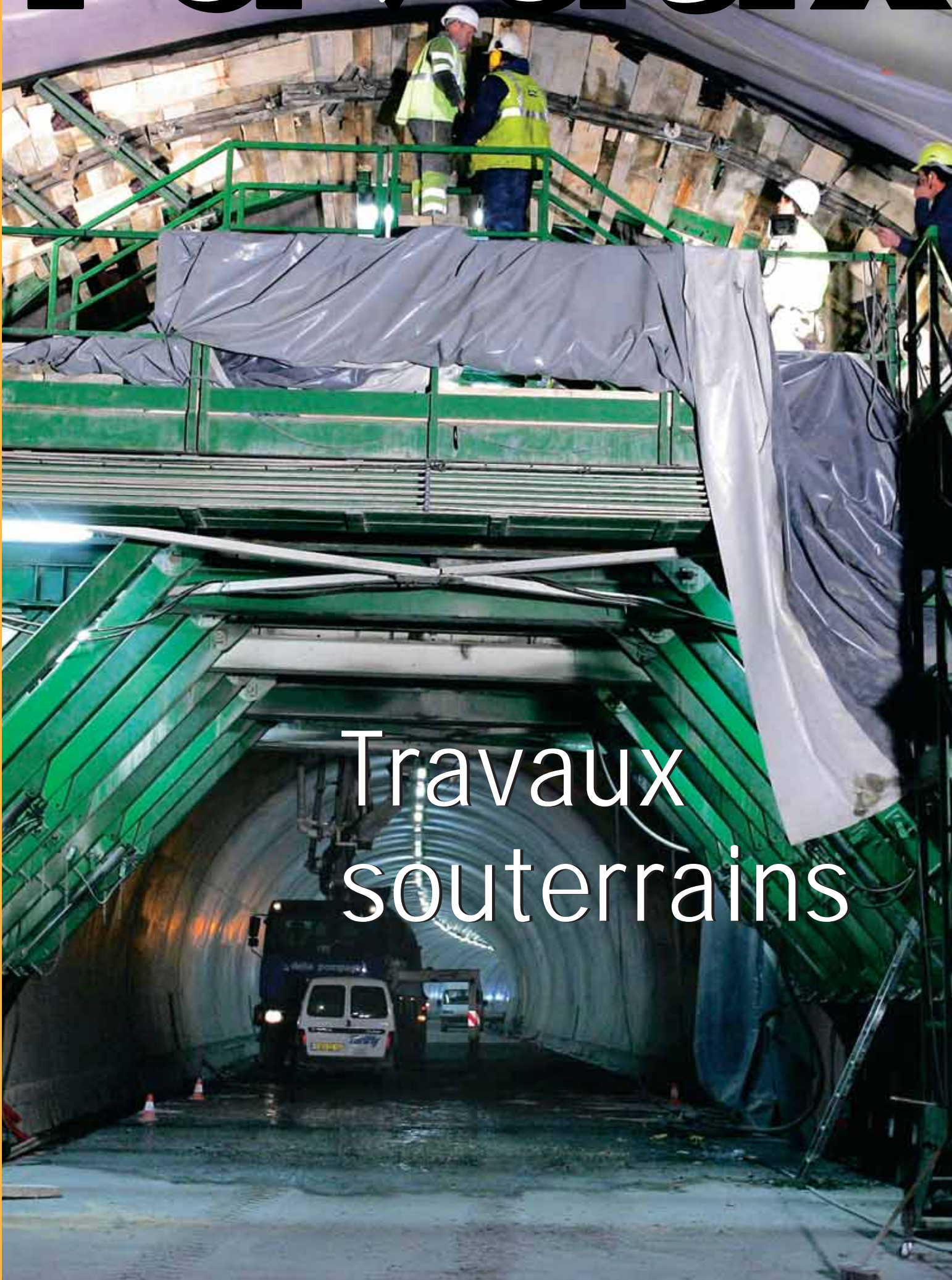


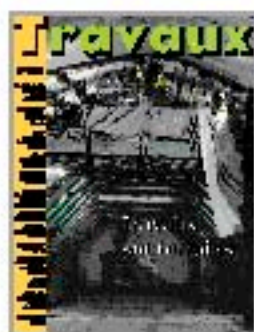
Travaux

n° 822

- Monitoring urbain sur la ligne 9 du métro de Barcelone
- Lok Ma Chau - Hong Kong. Congélation des sols
 - A51 - Coynelle/Col du Fau. Le tunnel de Sinard
 - Tunnel de la déviation de Schirmeck
- Transfert des eaux de Salazie à la Réunion
- Prises d'eau de la rivière du Mât et de la rivière des Fleurs Jaunes
- Descenderie de St-Martin-la-Porte
- Perpignan - Figueras. Le tunnel du Perthus
- Tunnels de CLP à Hong Kong
- La technologie Sol Data appliquée aux stockages radioactifs
 - Tunnel des Monts
- Regain d'un métier historique de Sogea Construction
- Tunnel Maurice Lemaire



Travaux souterrains



Notre couverture

A51. Le tunnel de Sinard

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Patrick Bernasconi

RÉDACTION

Roland Girardot et André Colson
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 44 13 31 03
colsons@trp.fr

SECRETARIE DE RÉDACTION

Françoise Godart
Tél. : (33) 02 41 18 11 41
Fax : (33) 02 41 18 11 51
francoise.godart@wanadoo.fr

VENTES ET ABONNEMENTS

Agnès Pétillon
10, rue Clément Marot - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 40 73 60 05
revuetravaux@wanadoo.fr

France (11 numéros) : 180 € TTC
Étranger (11 numéros) : 225 €
Étudiants (11 numéros) : 75 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)

MAQUETE

T2B & H
6/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris
Tél. : (33) 01 44 64 64 20

PUBLICITÉ

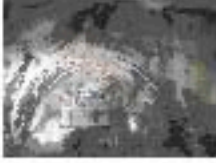
Régie Publicité Industrielle
Martin Fabre
61, bd de Picpus - 75012 Paris
Tél. : (33) 01 44 74 66 36

Imprimerie Unirat
Saint-Just-la-Pendue (Loire)

La revue Travaux s'efforce, pour l'information de ses lecteurs, de permettre l'accession de toutes les données scientifiques et techniques. Tous les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur ne saurait être tenu de refuser toute insertion, fût-elle contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).
Droits réservés : photocopies interdites, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (Code pénal, article 425).

Éditions Travaux et Industrie S.A.
3, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n° 0105 T 90259



éditorial

Roland Girardot et Patrick Bernasconi

1

actualités

6

PRÉFACE

Michel Doffayet

15

◆ Monitoring urbain pendant le percement de la ligne 9 du métro de Barcelone
- Urban monitoring during drilling of Barcelona metro line 9
E. Gastine, S. Pizarro

16

◆ Congélation des sols sous les tropiques. Expérience des tunnels de Lok Ma Chau à Hong Kong
- Ground freezing in the tropics. Experience of the Lok Ma Chau tunnels in Hong Kong
D. Martin, R. Stearns, G. Crellin, B. Kizis, R. Hasle, J.-L. Pignon

21

◆ A51 - Coynelle/Col du Fau. Le tunnel de Sinard
- A51 - Coynelle/Col du Fau. The Sinard tunnel
J. Martin, P. Hünigant, L. Roux, P. Goyet

29

◆ Le tunnel de la déviation de Schirmeck dans les Vosges
- The Schirmeck bypass tunnel in the Vosges mountains
P. Ramon, P. Bazzani

46

◆ Le transfert des eaux de Salazie à la Réunion
- Transfer of the Salazie waters on Reunion Island
Ch. Rousseau

51

◆ Ile de la Réunion. Prises d'eau de la rivière du Mât et de la rivière des Fleurs Jaunes
- Reunion Island. Water intakes in the Mât River and the Fleurs Jaunes River
I. Amami, Ch. Bataillon, J. Massot

56

◆ Liaison ferroviaire Lyon-Turin. La descendrière de Saint-Martin-la-Porte
- Lyons-Turin rail link. The inclined gallery of Saint-Martin-la-Porte
G. Crellin, L. Diérenot, J. Trillot

65

◆ Ligne ferroviaire à grande vitesse Perpignan-Figueras. Les tunneliers du tunnel du Perthus
- Perpignan-Figueras high-speed railway line. The tunnel boring machines for the Perthus tunnel
J.-Ph. Diérenot, M. Duvaret

70

Sommaire

septembre 2005

Travaux souterrains

Dans les prochains numéros

- Route des Tamarins
- Plates-formes aéroportuaires
- Terrassements
- Routes et Travaux urbains
- Ponts
- International
- Environnement
- Réhabilitation



◆ Tunnels de CLP à Hong Kong. Conception et construction de tunnels de faible section dans le granite
- *CLP tunnels in Hong Kong. Design and construction of small-cross-section tunnels in granite*
E. Wong, P. Ip, A. Raine, Fr. Vallon

75



◆ Gestion des données : la technologie Sol Data appliquée aux stockages radioactifs
- *Data management : the Sol Data technology applied to radioactive storage units*
Ph. Tabani, M. Beth, J. Delay, P. Da Fonseca

84



◆ Le tunnel des Monts - Réhabilitation de l'ouvrage
- *The Monts tunnel - Renovation of the structure*
B. Boy, J.-P. Mizzi

88



◆ Le regain d'un métier historique de Sogea Construction
- *Revival of an historic business of Sogea Construction*
Divers auteurs

96



◆ Travaux de génie civil de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire
- *Civil engineering work to improve safety for the Maurice Lemaire tunnel*
A. Duteil, Br. Combe

104

ABONNEMENT TRAVAUX

répertoire des fournisseurs

123

Encart après p. 48

INDEX DES ANNONCEURS

ALKOR DRAKA	121	IDETEC	120
ARCADIS	122	MIRE	122
ATC BTP	119	MS	118
ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION	2È DE COUVERTURE	ORSTA STAL	119
BEC FRÈRES	45	PATRY	117
BOTTE FONDATIONS.....	13	PRESSPALI	4È DE COUVERTURE
CAP	113	PRO BTP	3È DE COUVERTURE
CNETP	14	RAZEL.....	69
COLBOND GEOSYNTHETICS.....	120	SADE	118
CONTINENTAL ARAMINE	111	SECO-RAIL.....	117
DE NEEF	73	SEFI-INTRAFOR	116
DEMATHIEU & BARD	64	SOL DATA.....	20
ENDEL	114	SOLEFFI	112
ETERNIT.....	7	SOLETANCHE BACHY	119
GTS	4	SOTRALENTZ CONSTRUCTION.....	115
HERRENKNECHT.....	121	SPIE BATIGNOLLES	117
IHC.....	10	SPIE FONDATIONS	2
		TREFILARBED FRANCE.....	8

Comme chaque année depuis plus de 10 ans, la revue *Travaux* consacre un numéro spécial aux travaux souterrains. Même si le poids de cette activité au sein de l'ensemble des travaux publics en France reste faible, il faut voir dans cette régularité l'expression de l'intérêt constant des professionnels pour un domaine qui évolue, innove techniquement, et sait les rassembler pour travailler ensemble et consolider le savoir-faire.

Les articles présentés dans ce numéro témoignent, une fois encore, de la diversité des activités dans le domaine du souterrain, mais aussi et surtout, des procédures et techniques mises en œuvre pour repousser plus loin encore les limites dans la construction des tunnels. Cela se traduit par :

- des prouesses au plan technique, dans la mise au point et l'utilisation de tunneliers toujours plus perfectionnés, et dans des conditions de terrains extrêmement diverses, avec des moyens de monitoring et de suivi très performants ;

- la capacité de franchir des terrains de très faibles caractéristiques mécaniques, ou des points singuliers en mettant si nécessaire en œuvre des moyens très élaborés comme l'injection, le jet grouting, ou la congélation comme dans l'exemple de Long Valley à Hongkong ;

- la réalisation de chantiers dans des conditions très difficiles, en site urbain particulièrement sensible au risque de tassement comme dans le cas du métro de Barcelone, en grande profondeur avec l'exemple du creusement dans les schistes houillers de Saint-Martin-la-Porte, ou encore sous la contrainte de maintenir le trafic pendant les travaux comme au tunnel des Monts à Chambéry ;

- le souci de réduire toujours davantage les impacts et les nuisances pour le voisinage ; bien évidemment en site urbanisé, mais également et de plus en plus fortement quel que soit le site. L'exemple du tunnel de Chi Ma Wan pour l'alimentation électrique de Hongkong, ou celui du Groene Hart en Hollande soulignent les implications extrêmes des contraintes liées à l'environnement.

A cela s'ajoute aussi la réalisation d'ouvrages souterrains aux usages très divers : stockage, transfert des eaux, réseaux, ou, pour le transport, d'infrastructures novatrices comme le métro de Barcelone ou le tunnel A86 à l'Ouest de Paris présenté dans un numéro spécifique il y a quelques mois. Ces projets ont ouvert de nouvelles perspectives et interpellent plus largement sur les nombreuses possibilités d'utilisation et d'aménagement de l'espace souterrain et du sous-sol.

Ce dynamisme et cette créativité contrastent depuis plusieurs années avec une morosité qui tient à la faiblesse du volume d'activité au plan national ; les chiffres publiés régulièrement par la FNTP en attestent avec un pourcentage des travaux souterrains qui ne dépasse pas les 1,7 à 1,8 %, à comparer aux 4 % et même davantage au milieu de la décennie 90. Pour les années qui viennent, et sans entrer dans le détail des projets, il me semble qu'un certain nombre d'opérations importantes prennent rang, que ce soit dans le domaine routier avec des tunnels sur autoroutes (A41, A89, A45...), des

doubléments d'ouvrages existants (Toulon, Tende...), ou des déviations d'itinéraires, et plus encore dans le domaine ferroviaire, avec plusieurs projets TGV "riches" en tunnels, ou l'ensemble des ouvrages liés au Lyon-Turin pour lequel le ministre des Transports et de l'Équipement a tout à fait récemment réaffirmé son intention d'avancer rapidement et d'aller vers un début effectif des travaux en 2010.

A court terme, dans le domaine routier, le programme de mise en sécurité des tunnels va bien sûr se poursuivre ; ces travaux, quoique généralement faibles en volume, se caractérisent souvent par des contraintes de chantier très fortes, ce qui nécessite beaucoup d'initiatives, d'invention et d'efforts de la part des maîtres d'œuvre et des entreprises. L'objectif de fin 2005 pour cadrer et faire valider par le Comité d'évaluation de la sécurité des tunnels routiers l'ensemble des travaux à réaliser sur les ouvrages du réseau national sera tenu. Beaucoup d'entre eux ont d'ores et déjà été entrepris mais il reste encore des chantiers très importants à mener dans les toutes

prochaines années.

L'évolution de la réglementation, très fournie ces derniers mois, avec la directive européenne du 29 avril 2004 en cours de transposition en droit français, mais aussi le récent décret du 24 juin 2005 sur la sécurité d'ouvrages du réseau routier, va rapidement conduire les collectivités territoriales qui ne l'auraient pas déjà fait à un examen détaillé de leurs propres tunnels de plus de 300 m. Après les incendies du Mont Blanc et des Tauern en 99, du Gothard en 2001, et plus récemment du tunnel du Fréjus, l'opinion publique fortement relayée par les médias, a pris conscience qu'un tunnel n'était pas sans danger, et qu'un accident grave pouvait se produire. Plutôt que de laisser se développer une attitude de refus ou de crainte vis-à-vis de tels ouvrages, il convient de faire en sorte de poursuivre nos efforts pour des ouvrages plus sûrs, mais aussi et surtout de davantage familiariser les usagers avec les tunnels, de leur apprendre à être vigilants et à savoir réagir en cas de difficultés, en utilisant notamment les équipements mis à leur disposition.

L'enjeu est important car le tunnel est, et restera indispensable ; il constitue bien souvent la seule solution pour parvenir à réussir l'insertion d'une infrastructure en milieu contraint ou sensible. Mon prédécesseur Philippe Sardin et moi-même avons fait de l'amélioration de la sécurité des tunnels une priorité pour le CETU ; mais cela doit être vrai également pour les maîtres d'ouvrage, les bureaux d'études et les entreprises car cette sécurité se construit à chacun des stades de la conception et de la réalisation de l'ouvrage. Dans le présent numéro, l'article sur le tunnel du Sinard et ses évolutions dans sa conception est particulièrement éloquent.

Pour conclure, et en ce mois de septembre, je m'en voudrais de ne pas évoquer l'événement majeur de cette fin d'année, à savoir le congrès de l'AFTES du 10 au 12 octobre à Chambéry. Cette association est pour beaucoup dans le dynamisme et la mobilisation des acteurs du monde souterrain et elle offre des lieux d'échanges et de travail tout à fait uniques.



■ MICHEL DEFFAYET

Directeur du Centre
d'études des tunnels
(CETU)

Ministère
des Transports,
de l'Équipement,
du Tourisme et de la Mer

Monitoring urbain pendant du métro de Barcelone

La ligne 9 du métro de Barcelone est, à l'heure actuelle, l'un des principaux projets européens de tunnel. Il comporte près de 34 km de souterrain à réaliser sous les parties les plus sensibles de la ville. Des moyens de monitoring importants ont été déployés pour surveiller ces travaux afin qu'ils se déroulent dans les meilleures conditions de sécurité. Leur mise en œuvre a été confiée à un groupement unique Sol Data - T5IIC dirigé par Sol Data.



Photo 1
Station Gorg
Gorg Station

Photo 2
Puits Iglezia
Iglezia shaft



Photo 3
Une station
Cyclops®
A Cyclops®
station



Le métro de Barcelone a lancé un programme ambitieux pour doubler la longueur totale de ses lignes d'ici 2010. La nouvelle ligne 9, avec ses 46 stations, desservira les faubourgs de l'agglomération barcelonaise comptant 2,7 millions d'habitants. Cette ligne s'étendra depuis le nouveau terminal – en cours de construction – de l'aéroport au Sud, jusqu'à la banlieue Nord de Can Zam. Elle reliera entre elles les cinq lignes de métro et les six lignes de chemin de fer sillonnant les banlieues. La ligne 9 comptera notamment un arrêt à la gare grandes lignes de Sagrera, sur la ligne à grande vitesse Madrid – Barcelone – frontière française.

La réalisation de ce projet, principalement en tunnel de grand diamètre, fait appel aux dernières techniques de monitoring urbain qui sont présentées ci-dessous.

■ DESCRIPTION DU TUNNEL

La géologie

La géologie joue un rôle important dans le tracé de la ligne 9. Le tracé coupe principalement des roches primaires constituées de granites, ainsi que des faciès tertiaires. Il y a deux exceptions qui sont la traversée des plaines alluviales des fleuves Besos et Llobregat où règnent des dépôts du pliocène.

Les études préalables ont montré que les caractéristiques des roches primaires sont très hétérogènes. Elles ont été tourmentées par les plissements et des intrusions granitiques hercyniens et elles présentent, dans la partie Nord du projet, une forte altération.

Un tunnel monotube à deux niveaux

En tenant compte de la géologie et des différents points de passages obligés du projet que sont l'aéroport, la foire de Barcelone et la gare TGV, le tracé a été optimisé pour desservir au mieux la population. Pas moins de 46 stations sont prévues (photo 1), par lesquelles devraient transiter à terme plus de 90 millions de voyageurs par an. En outre, ce tracé comprendra 12 interconnexions avec les lignes de métro existantes (photo 2).

C'est pour réduire l'impact des travaux sur le milieu urbain ainsi que les conséquences des risques géologiques, que les concepteurs ont prévu un seul

le percement de la ligne 9

Eric Gastine



DIRECTEUR GÉNÉRAL
ADJOINT
Sol Data

Sébastien Picaut



DIRECTEUR GÉNÉRAL
Sol Data Iberia

tunnel de 12 m de diamètre dans lequel les trains circuleront sur deux étages.

Risque de tassements importants et différentiels

Le creusement d'un tunnel de grand diamètre et de nombreuses stations dans des formations hétérogènes sous un tissu urbain dense constitué d'immeubles anciens souvent fondés superficiellement, présente un ensemble de facteurs de risque de déformations nuisibles.

Le maître de l'ouvrage et les maîtres d'œuvre du projet de la ligne 9 ont prévu de mettre en place, dès l'origine, les outils nécessaires à la maîtrise du risque. C'est ce qu'il est convenu d'appeler le monitoring.

■ LE DISPOSITIF DE MONITORING

Les caractéristiques principales du dispositif de monitoring pour la ligne 9 du métro de Barcelone sont les suivantes :

- ◆ c'est un contrat unique de monitoring qui couvre toute la ligne 9, de façon à garantir l'homogénéité des informations recueillies. Par la même occasion, le coût de l'opération s'en trouve optimisé ;
- ◆ le contrat de monitoring est passé en direct, indépendamment des entrepreneurs principaux qui exécutent les travaux. C'est la garantie d'une information complète et transparente ;
- ◆ la fréquence des mesures est adaptée au temps de réaction entre le sol et la structure, de façon à anticiper les déformations plutôt que de constater les dommages qui en résulteraient ;
- ◆ les informations sont mises à la disposition des différents intervenants en continu et en temps réel, de sorte que les entrepreneurs puissent gérer immédiatement les alarmes, sous leur propre responsabilité.

■ LA SURVEILLANCE DES SURFACES BÂTIES

Le contrat prévoit le déploiement d'une centaine d'appareils de topographie robotisés Cyclops® (photo 3). Répartis sur près de 600 positions le long du tracé, ils permettent de surveiller près de 30000 prismes-cibles, en temps réel. C'est Sol Data qui, au sein du groupement, prend en charge entièrement cette prestation.



Photo 4
Mesure dans un extensomètre incrémental

Measurement in an incremental extensometer

Les prismes-cibles sont fixés sur les immeubles, bâtiments et structures situés de part et d'autre de l'axe du tunnel. Leur position est relevée automatiquement en XY et Z par des Cyclops®. Les informations sont envoyées en temps réel au centre de traitement par l'intermédiaire d'un réseau hertzien dédié qui couvre l'ensemble de la ville de Barcelone.

Les Cyclops®, s'ils sont placés dans une zone de tassement, ont la capacité de travailler en groupe et de corriger immédiatement les mesures de l'incidence de leurs mouvements propres. Ils prennent également en compte les variations de pression et de température.

Ces appareils délivrent ainsi des mesures absolues, quelles que soient les subsidences que provoquent les tunneliers ou les variations atmosphériques.

Les mesures atmosphériques sont réalisées à partir d'une dizaine de stations météorologiques réparties sur l'ensemble du trajet. Ces stations sont, comme les Cyclops®, reliées au réseau radio et leurs mesures sont intégrées en temps réel dans la chaîne de traitement des Cyclops®.

Le réseau des Cyclops® est contrôlé et complété régulièrement par des mesures manuelles qui sont immédiatement intégrées par des géomètres dans la base de donnée Geoscope® qui rassemble toutes les informations du projet.

Photo 5
Equipe chargée
des mesures
dans le tunnel

*Team in charge
of measuring
in the tunnel*



Photo 6
Contrôle des instruments
dans les voussoirs
sur le parc
de préfabrication

*Checking the instruments
in the segments
on the prefabrication yard*



► La précision finale des mesures de déformations et de tassements est supérieure à $\pm 0,5$ mm à 60 m.

■ LA SURVEILLANCE DES PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES

L'observation de la réaction instantanée du sous-sol aux travaux permet de prévenir de la survenance de fontis et de détecter leur localisation. Le dispositif d'auscultation géotechnique comprend des piézomètres pour la surveillance de la nappe phréatique, ainsi que des tassomètres, des extensomètres incrémentaux (photo 4) et des inclinomètres pour le contrôle des déformations à l'intérieur du

sol. Des équipes de techniciens assurent au quotidien l'installation et la maintenance des forages instrumentés, ainsi que les relevés des mesures, lesquels sont manuels ou automatiques.

Le projet prévoit, sur l'ensemble du tracé, plus de 17 000 m de forages instrumentés et 4 300 capteurs géotechniques.

Les données sont centralisées dans la base de données d'instrumentation Geoscope® et mises à la disposition de tous les intervenants immédiatement sur Internet par accès sécurisé.

■ LA SURVEILLANCE DU TUNNEL

Le groupement Sol Data - T5IIC assure également la mise en place et la mesure des capteurs de contraintes et de déformation dans les tunnels une fois construits (photo 5).

Des profils de contrôles sont prévus tous les 100 m en moyenne. Ils comprennent :

- ◆ des jauges de contrainte à corde vibrante noyées dans le béton des voussoirs permettant de mesurer les contraintes parallèles à l'axe du tunnel et tangentielles à chaque voussoir (photo 6) ;
- ◆ des cellules de mesure de la pression totale sur l'extrados de certains voussoirs ;
- ◆ des prismes-cibles pour la mesure optique de la convergence des tunnels.

Les capteurs sont installés dans des voussoirs, à l'usine de préfabrication. Ils sont testés et repérés. Juste après leur mise en place, les techniciens de Sol Data - T5IIC procèdent aux connexions et à la première mesure ou mesure "0" qui est déterminante pour bien appréhender le comportement des voussoirs lors de leur mise en charge dans le terrain.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 600 positions de Cyclops® et 30 000 points de mesure
- 4 320 instruments de mesure géotechnique (piézomètres ouverts, cellules de pression totale, cellules de charge, jauges de contrainte en tunnel, extensomètres en forage, extensomètres incrémentaux, tassomètres, inclinomètres, inclinomètres horizontaux, jauges de température)
- 17 530 ml de forages instrumentés
- 20 stations météorologiques
- 10 000 points de mesure de nivellement manuel
- 340 profils de mesure de convergence en tunnel

Les données sont centralisées dans la base de données d'instrumentation Geoscope® et elles sont immédiatement mises à la disposition de tous les intervenants par accès Internet sécurisé.

LE PARTAGE DE L'INFORMATION GRÂCE AU RÉSEAU RADIO

L'intérêt de l'instrumentation et de la surveillance réside principalement dans la capacité d'alerter très tôt afin d'anticiper les incidents. Aussi Sol Data a-t-elle déployé pour la ligne 9 du métro de Barcelone son logiciel d'instrumentation Geoscope® qui permet notamment :

- ◆ le pilotage et l'acquisition en temps réel des données rassemblées sur un vaste ensemble de points de mesures couvrant les 40 km de chantier (réseau hertzien dédié) ;
- ◆ le traitement en temps réel des mesures brutes : corrections de températures et de pression, corrections de mouvements propres par la méthode des moindres carrés, traduction des grandeurs fréquentielles des capteurs à cordes vibrantes en mesures physiques, etc. ;
- ◆ le contrôle automatique de la cohérence des données et l'analyse statistique des informations pour déclencher en temps réel des alarmes fiables ;
- ◆ la visualisation en temps réel des données sur un Système d'Information Géographique puissant capable de tracer en temps réel les iso-lignes de tassement (figures 1 et 2), les déformées inclinométriques, ou encore des coupes le long de l'axe du tunnel ;
- ◆ le stockage de toutes les mesures du chantier dans une base de donnée cohérente, rationnelle et sécurisée ;
- ◆ le partage de l'information selon des droits prédéterminés pour chaque intervenant du chantier, soit au total 18 entreprises générales, quatre maîtres d'œuvre, le maître d'ouvrage et les experts.

VALIDATION DES TECHNIQUES DE SURVEILLANCE PAR SATELLITE

Le site du métro de Barcelone a été choisi par Sol Data pour valider et tester au stade industriel la technique innovante de surveillance par satellite des subsidences urbaines. Ce programme a été conduit avec l'appui de l'Agence Spatiale Européenne ESA.

Ce principe de mesure n'a rien à voir avec le GPS (Global Positioning System). Il est basé sur l'utilisation des puissants radars des satellites pour déterminer par interférométrie le tassement ou le soulèvement de points réfléchissants. Un des intérêts majeurs de la technique est de pouvoir surveiller la subsidence de larges zones : grands

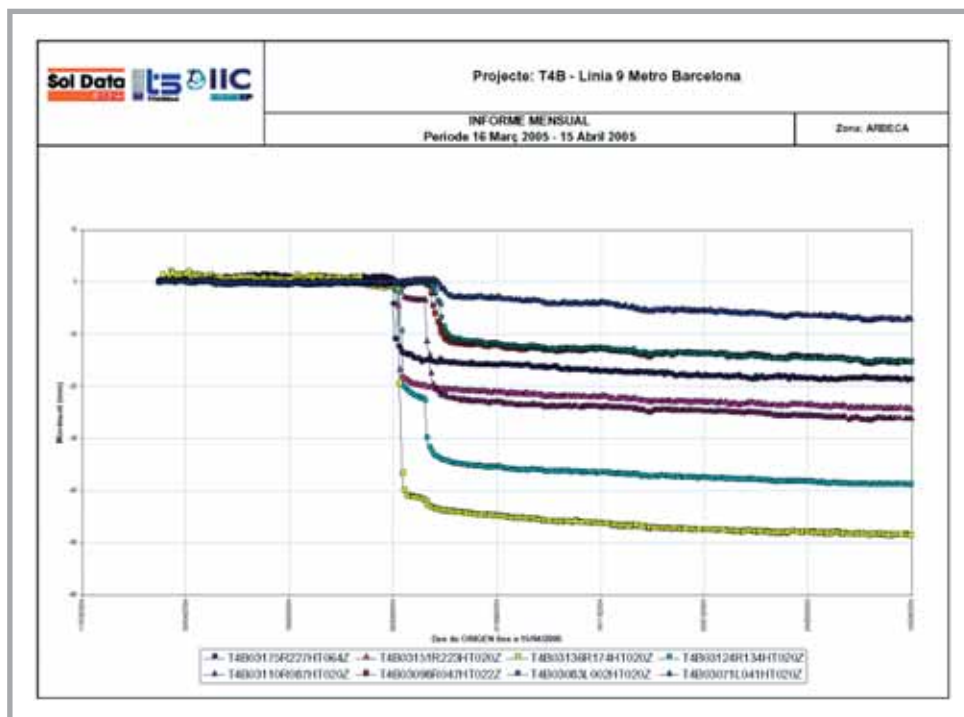


Figure 1
Courbes de tassement (simulation pour démonstration)
Subsidence curves (simulation as a demonstration)

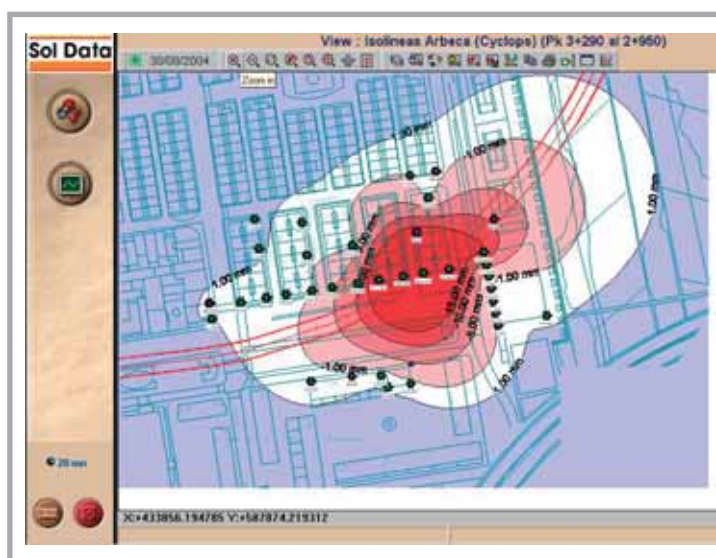


Figure 2
Visualisation en temps réel des courbes de niveau du tassement (simulation pour démonstration)
Real-time viewing of subsidence level curves (simulation as a demonstration)

travaux, digues, routes, voies ferrées, etc. On dispose d'archives depuis 1992, ce qui permet dans certains cas et si on le désire, de remonter dans le temps en comparant la position actuelle à une référence très ancienne.

A Barcelone, la précision de mesure a été validée pour la première fois en situation réelle. On a pu déterminer une précision de 2,5 mm en surveillance altimétrique, avec près de 120 000 points mesurés à chaque passage de satellite. Cela a permis également d'industrialiser les outils indispensables pour un service professionnel : traitement des données, procédures de calibration, logiciels de gestion du million de mesures générés par les interférogrammes.

L'ensemble du procédé, fruit de ce travail, a été baptisé ICAR®. Il rejoint la liste des innovations technologiques majeures du groupe Sol Data.

► ■ CONCLUSION

L'étendue du chantier, la durée du projet, la difficulté du terrain et l'importance du bâti existant sont des critères qui militent pour une surveillance bien organisée.

Le choix de mettre en place une instrumentation en grande partie automatique, indépendante du marché des travaux de construction, démontre l'attention que le maître d'ouvrage GISA porte à la maîtrise des risques pendant le déroulement du projet. Le monitoring déployé sur les 40 km du tracé de la ligne 9 du métro de Barcelone a d'ores et déjà permis de prévenir plusieurs difficultés. Des tassements observés très tôt sur les bâtiments ont pu ainsi rapidement être contenus en procédant à temps à l'arrêt momentané du tunnelier et à la modification des conditions du percement.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Client

GISA (Gestió d'Infraestructures S.A., empresa pública de la Generalitat de Catalunya)

Maîtrise d'œuvre

Paymacotas

Instrumentation - Auscultation ligne 9

Sol Data Iberia - T5IIC

ABSTRACT

Urban monitoring during drilling of Barcelona metro line 9

E. Gastine, S. Picaut

Line 9 of the Barcelona metro system is one of the leading European tunnel projects underway at the present time. It involves around 34 km of underground tunnelling to be executed under the most sensitive parts of the city. Major monitoring facilities have been deployed to supervise these works, to ensure that they take place in optimum safety conditions. Their setup was entrusted to a single consortium formed of Sol Data and T5IIC, led by Sol Data.

RESUMEN ESPAÑOL

Monitoreo urbano durante la perforación de la línea 9 del metro de Barcelona

E. Gastine y S. Picaut

La línea 9 del metro de Barcelona constituye, hoy día, uno de los principales proyectos europeos de túneles. Consta de cerca de 34 km de subterráneo a ejecutar bajo las partes más sensibles de la ciudad. Se han desplegado diversos importantes medios de monitoreo para supervisar estos trabajos con objeto que se desarrollan en las mejores condiciones de seguridad. Su puesta en aplicación se ha encargado a una agrupación única Sol Data - T5IIC dirigida por Sol Data.

Sol Data

Mesurer pour protéger

Déformations – Vibrations - Environnement

Présents sur des grands chantiers européens (métro d'Amsterdam, métro L9 de Barcelone, terminal Eurostar de Londres, laboratoire ANDRA à Bure) ou sur des projets plus modestes, nous mettons en œuvre des moyens pour suivre l'évolution des paramètres du sol et des structures.

**Stand C76 au congrès AFTES 2005
(10, 11, 12 octobre à Chambéry)**

**SOLDATA – 294 Avenue Georges Clemenceau – 92000 Nanterre
Tel : + 33 1 41 44 85 00, Fax : + 33 1 41 44 85 11, www.soldatagroup.com**

Congélation des sols sous les tropiques

Expérience des tunnels de Lok Ma Chau à Hong Kong

La protection absolue de l'environnement, interdisant accès, sondage et travaux depuis la surface, nous avons choisi de construire les inter-tubes des tunnels de Lok Ma Chau sous congélation et à partir d'un des deux tunnels, l'autre étant en cours de percement.

Olivier Martin
DIRECTEUR ADJOINT
Bouygues TP Paris

Roger Storry
GEOTECHNICAL MANAGER
Dragages Hong Kong

Gilles Cachia
DESIGN SN ENGINEER
Dragages Hong Kong

Benjamin Kitzis
METHOD MANAGER
Dragages Hong Kong

Ronan Hasle
CONSTRUCTION MANAGER
Intrafor Hong Kong

Jean-Louis Pégon
DIRECTEUR
Bouygues TP Paris

Les travaux consistent à réaliser une liaison ferrée souterraine de façon à doubler la capacité de liaison transfrontalière entre la zone économique de Hong Kong et celle de Shenzhen et permettre à 200 000 personnes de transiter tous les jours dans un plus grand confort.

Le projet a été présenté dans *Travaux* n° 817 de mars 2005. Les deux tunnels principaux de 3,2 km de longueur et 7,6 m de diamètre intérieur sont reliés entre eux par deux puits d'accès verticaux et douze inter-tubes à une fréquence de 240 m. A la traversée de la zone protégée de Long Valley de 1 km de longueur, trois inter-tubes sont construits sous congélation. Cet article décrit les dispositions prises pour ces travaux.

La figure 1 présente la configuration types des trois inter-tubes dans la géologie locale de Lok Ma Chau. Les tunnels se situent 12 m sous le niveau du terrain naturel et 10 m sous la nappe. Les inter-tubes sont positionnés dans une couche stable de rocher volcanique décomposé plus ou moins loin de l'interface rocheuse (CP2 est 10 m au-dessus, CP3 2 m au-dessus et CP4 est à cheval sur l'interface rocheuse). La nappe est située dans les remblais et les alluvions et il était clairement indiqué dans le contrat que les conditions hydrogéologiques ne pouvaient être perturbées vis-à-vis de l'agriculture.

LES CONDITIONS GÉOTECHNIQUES

Les trois inter-tubes sont situés dans les horizons de roche volcanique complètement décomposée typiques des zones tropicales. Les caractéristiques géotechniques ont été étudiées avec précision. Les courbes granulométriques, sur la figure 2, présentent des variations sensibles sur le tracé du projet mais confèrent au matériau une prédominance de silts (50 à 70 %) avec 10 % d'argile, 10 à 20 % de sable et le reste en graviers et blocs rocheux. Les sols résiduels sont variables en fonction de l'altération de la matrice rocheuse et la

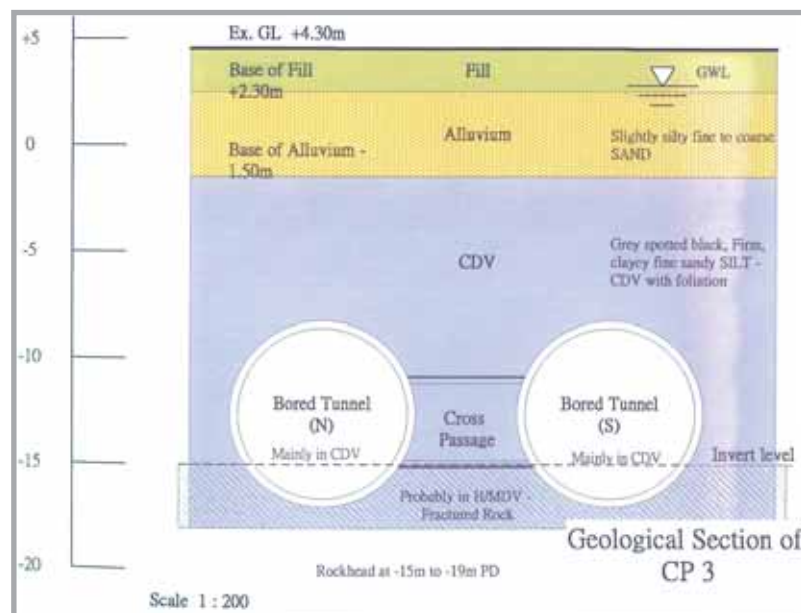


Figure 1
Coupe transversale des tunnels au droit des inter-tubes
Cross section of the tunnels at the level of the intertubes

Figure 2
Courbe granulométrique des échantillons de CDV
Grading curve of CDV rock samples

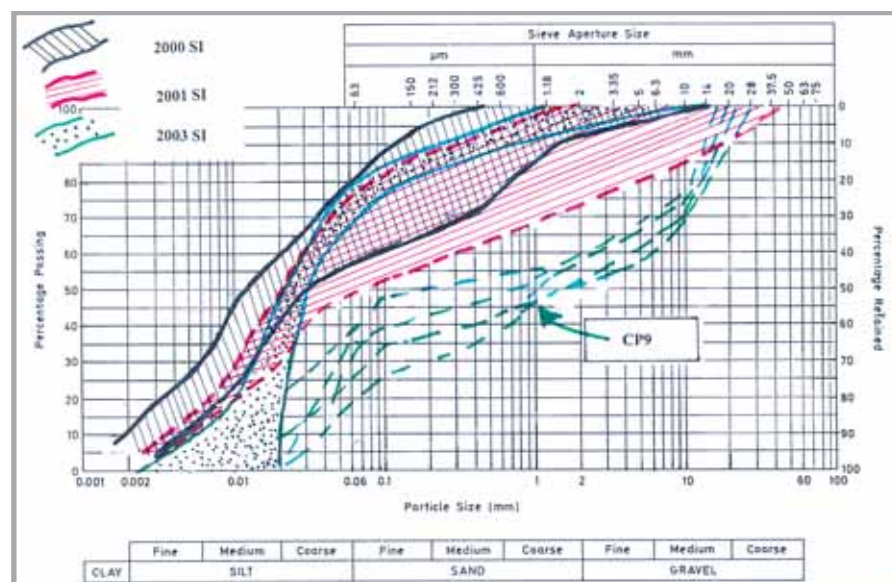


Figure 3
Résistances non drainées vs profondeur
Undrained resistance vs depth

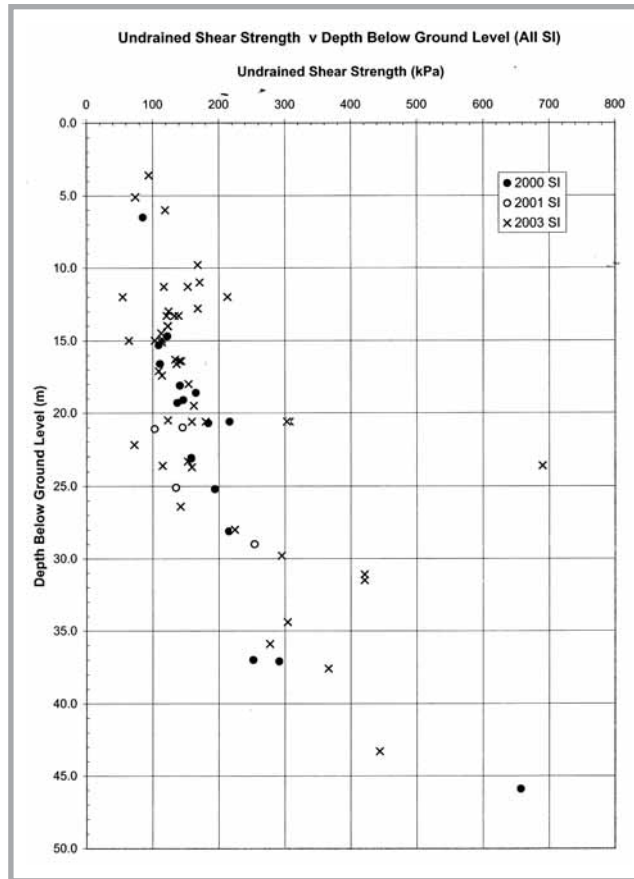


Figure 5
Echantillons de sols congelés
Frozen soil samples



Figure 6
Résistance à -5° C et 1 % / min
Resistance at -5° C and 1 % per min.

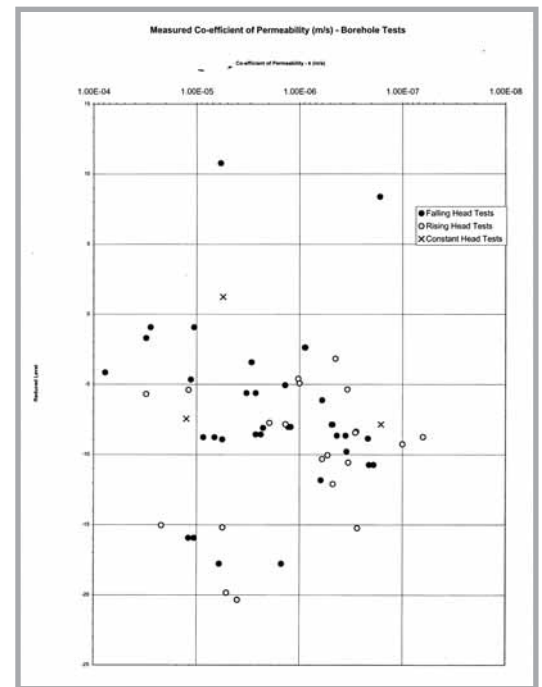
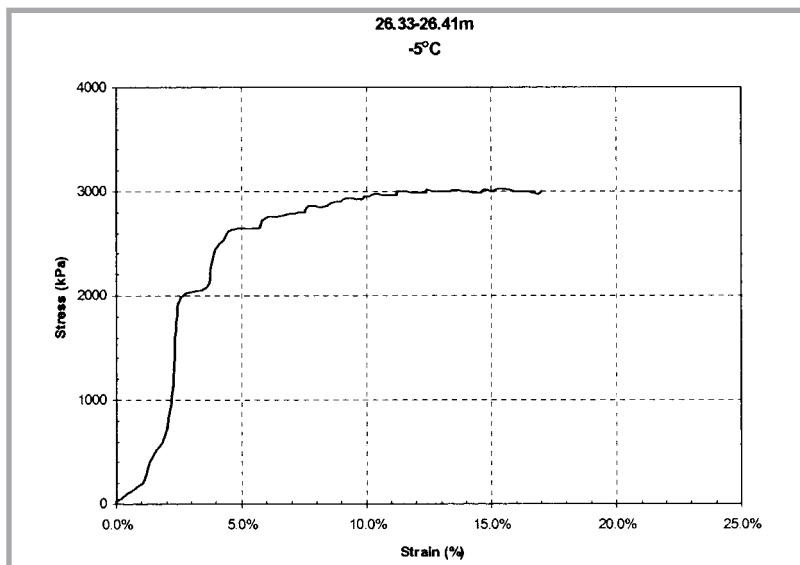


Figure 4
Perméabilité vs profondeur
Permeability vs depth

partie de graviers et blocs reflète la proximité de l'interface avec le rocher.

Les caractéristiques mécaniques sont bonnes au droit des inter-tubes et confèrent au matériau des résistances non drainées de 100 à 200 kPa, et des modules de déformation de 20 à 50 MPa. Les perméabilités sont très variables et reflètent la grande dispersion des mesures granulométriques. Elles varient de E-4 à E-7 avec une valeur moyenne autour de 5 E-6 représentative des sols résiduels. L'expérience de Hong Kong révèle un matériau propre à fonder les bâtiments mais très sensible à la circulation de l'eau et dangereux dans les excavations sous nappe (figures 3 et 4).

LES ESSAIS DE SOL CONGELÉ

Il y a très peu de référence sur les sols résiduels congelés et les essais réalisés au Canada ont permis de cerner les résistances du matériau congelé et d'appréhender les propriétés de fluage et de gonflement. Les essais ont été réalisés à vitesse de déformation rapide et lente, sous pression de confinement nulle et en place, aux températures de -5°, -10°, -15° C (figures 5 et 6).

Au total 14 essais ont montré une bonne stabilité des résultats et des comportements satisfaisants des échantillons. Les résultats principaux sont les suivants :

- ◆ une résistance peu variable entre -5° et -15° C ;
- ◆ une résistance de 2,8 MPa à 1 % / min et de 1,8 MPa à 0,01 % / min ;
- ◆ un fluage très faible pour des contraintes inférieures à 2 MPa ;
- ◆ des ruptures nettes et fragiles ;

◆ un gonflement faible pour des pressions de confinement correspondant aux pressions en place, de l'ordre de 25 % du gonflement de la partie d'eau (figures 7 et 8).

Les essais ont été réalisés dans des chambres froides par presses universelles suivant les recommandations de l'université d'Alberta sous la conduite du professeur Segó.

■ SIMULATION THERMIQUE ET MÉCANIQUE

La figure 9 donne l'évolution des champs de température dans le sol pendant la phase de congélation et pendant l'excavation de l'inter-tube. Les couleurs jaunes et orange indiquent des températures positives (0° à +15° C et +15° à +25° C), le vert et le bleu les températures négatives (0° à -10° C et -10° à -30° C).

Les coupes transversales et longitudinales sont représentées aux mêmes instants. La coupe transversale montre le champ de température le long de l'inter-tube et la coupe longitudinale indique les variations aux abords des deux tunnels principaux, en haut le tunnel DT d'où l'ensemble des tubes est foré et en bas le tunnel UT en cours de construction.

Quatre situations sont données :

1. Après le début de la mise en froid alors que le sol congelé se situe uniquement en proximité des congélateurs.
 2. Lorsque les courbes de sol congelé forment un anneau fermé et connecté aux deux extrémités.
 3. Lorsque la température est suffisamment basse pour donner au cylindre congelé la résistance nécessaire à reprendre les efforts appliqués lors de l'excavation,
 4. Pendant l'excavation lorsque la découpe du terrain modifie les courbes isothermes dans le sol.
- Les calculs en 3D ont confirmé les résultats des modèles axisymétriques à savoir que les tunnels principaux créent des conditions de déperdition de chaleur importantes et qu'il était économiquement censé d'ajouter isolation et congélation sur les extrémités de l'anneau de glace.

■ L'INSTRUMENTATION ET LE SUIVI DES MESURES THERMIQUES

Le circuit de refroidissement et chaque inter-tube ont fait l'objet d'un suivi rigoureux et exhaustif dont le but est triple :

- ◆ s'assurer du bon fonctionnement des groupes de froid (soit détecter toute anomalie);
- ◆ valider le comportement du sol au froid et les conditions aux limites (ou rechercher les points faibles du système);

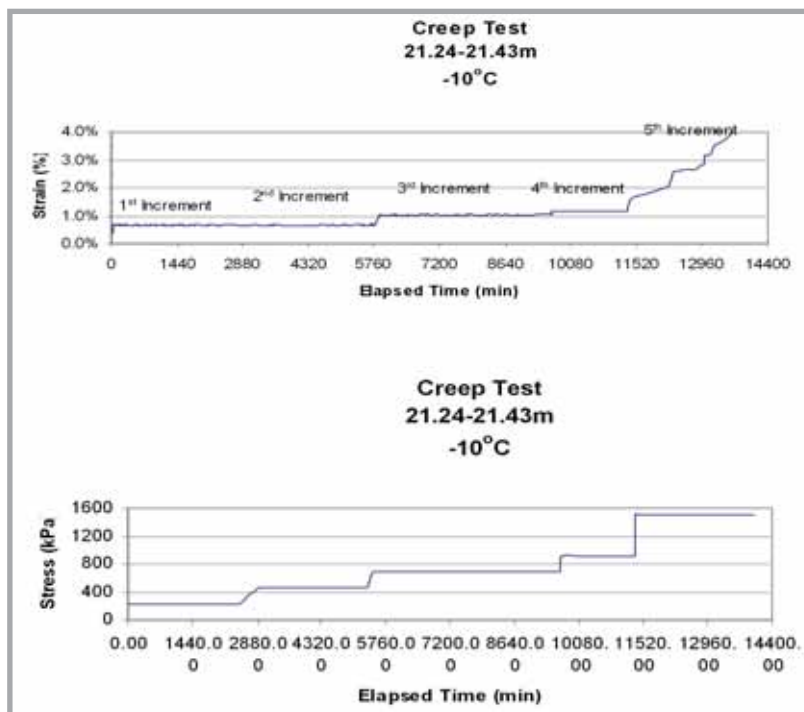


Figure 7
Essais de fluage
Creep tests

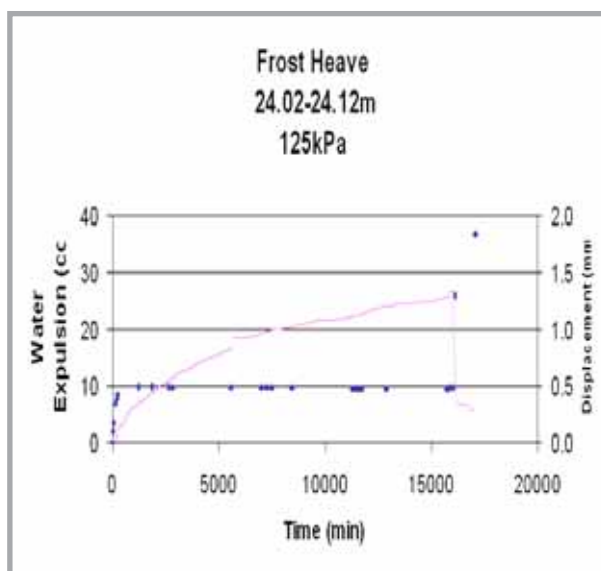
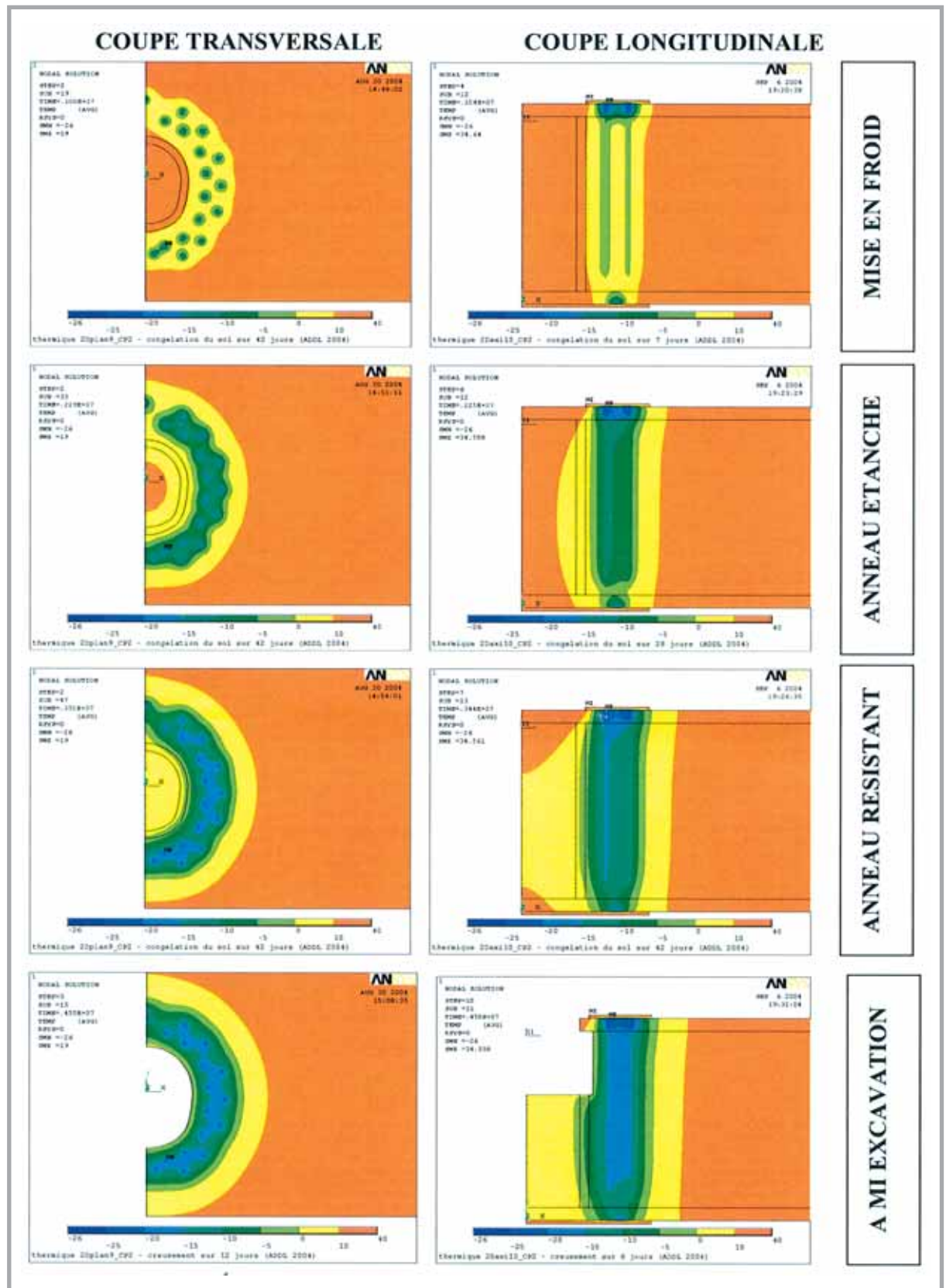


Figure 8
Essais de gonflement
Swelling tests

QUANTITÉS ET PROGRAMME

- Nombre de forages : 3 x 32
- Linéaire total des forages : 3 x 216 m
- Groupe de froid : 3 x 90 MW
- Préparation/forage : 2 mois
- Installation de froid/essais : 1 mois
- Mise en froid : 4 semaines
- Contrôle : 1 semaine
- Excavation : 2 semaines
- Étanchéité/revêtement : 2 semaines
- Arrêt de la mise en froid : 2 mois

Figure 9
Développement du froid
et impact de l'excavation
*Cold development
and impact of excavation*



◆ définir le moment opportun pour démarrer les excavations (et garantir la sécurité des ouvriers et des tunnels).
La mise en froid est assurée par trois groupes de 90 kW mis en parallèle pour alimenter un bassin tampon qui à son tour distribue la saumure aux trois inter-tubes en parallèle. Ce schéma d'installation, illustré en figure 10, permet de réduire l'impact d'une panne de groupe et assure une bonne stabilité du système même si les trois groupes venaient à s'arrêter. Il permet en plus de réaliser les

opérations de maintenance sans risque pour aucun des circuits de froid.
Le circuit d'alimentation en saumure a été contrôlé en 10 points en température et en 7 points en débit. Le suivi se fait toutes les deux heures.
Le suivi des travaux se fait 24 heures sur 24 de façon à assurer le suivi des mesures et permettre une intervention rapide en cas de panne mécanique. Les mesures de température sont tellement fines et sensibles que tout arrêt du groupe de plus d'une heure est détecté et peut être réparé.

La figure 11 donne l'historique des températures des circuits DT en bleu (congélateurs dans le sol mis en place à partir du tunnel DT fini) et UT en rouge (congélateur sur l'intrados du revêtement du tunnel UT en cours de construction). Chaque graduation de temps correspond à une semaine. La température de calcul de -28° DT et -20° UT a été en permanence assurée et même dépassée lors de la phase d'excavation.

Le suivi du développement de la congélation dans le sol s'est fait au moyen de quatre séries de six sondes thermiques placées dans un tube foré qui est soit parallèle à l'anneau de glace soit sécant. Elles permettent de contrôler les températures à cœur et l'extension de la zone congelée. La figure 12 donne les résultats suivant un calcul de recollement permettant de simuler correctement les températures de la saumure et donc l'énergie de froid absorbée dans le sol.

La figure 13 donne les mesures directes. Les unités de temps données en abscisse sont identiques et correspondent à 10,5 jours. Les unités de températures en ordonnées correspondent à 5° C et l'échelle varie de $+30^{\circ}$ à -30° C. La comparaison montre une très bonne corrélation avec cependant un léger déficit de froid dans les simulations numériques pour les points de mesure situés entre les tubes de congélation.

Les jauges situées proches des tunnels principaux ont été perturbées par les apports thermiques des tunnels en creusement. Leurs températures, contrôlées en continu, ont varié entre 32° et 25° C soit avec une certaine marge par rapport à celle retenue dans les calculs ($+40^{\circ}$ C). De plus, la concavité des tunnels modifie la géométrie du sol congelé et réduit l'épaisseur de l'anneau résistant au contact des tunnels. C'est le contact aux deux tunnels qui s'est avéré le point critique pour assurer la bonne géométrie de l'enveloppe congelée et autoriser les excavations. Ce phénomène est montré sur la figure 14.

Les températures sont données à une même date pour les six jauges de température de la sonde TS2. Elles montrent un écart qui varie côté DT de 0° initialement, à 5° avant franchissement du seuil de congélation à 18° au cours du franchissement pour redescendre à 8° .

Côté UT, l'écart varie de 0° , à 16° , puis 25° pour redescendre à 16° . C'est significatif de l'effort supplémentaire à fournir aux extrémités pour assurer un contact suffisant avec les tunnels courants.

LE SUIVI DES DÉFORMATIONS ET L'IMPACT SUR LES TUNNELS PRINCIPAUX

Les tunnels principaux ont été eux aussi instrumentés pour évaluer l'ovalisation engendrée par les travaux de congélation et par l'excavation. Deux

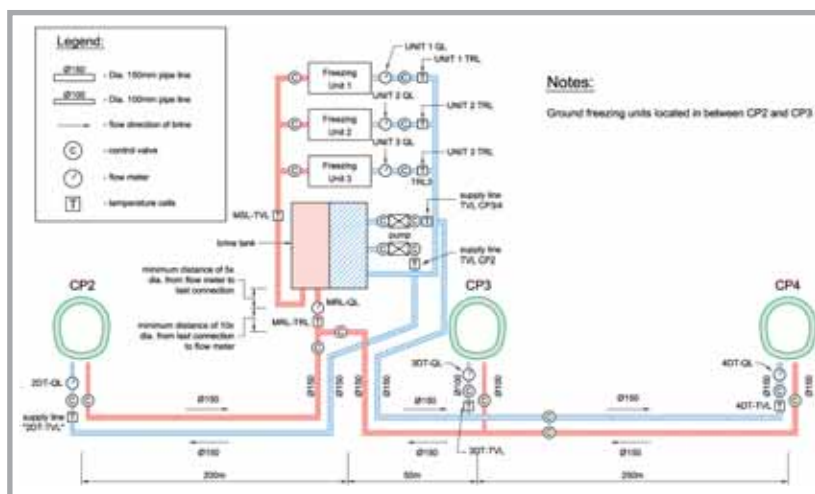


Figure 10
Circuit
d'alimentation
Power supply
circuit

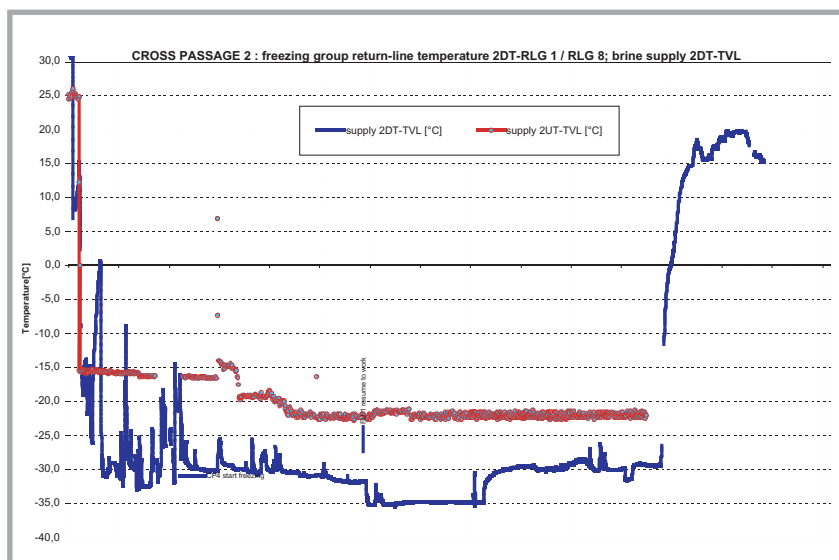


Figure 11
Mesures
des températures
des circuits DT
et UT
DT and UT circuit
temperature
measurements

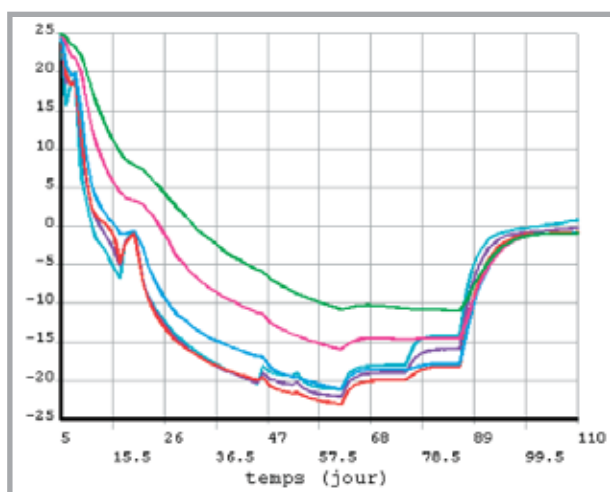


Figure 12
Simulation numérique
des températures
dans le sol de la sonde
TS2
Digital simulation
of temperatures
in the soil for the TS2
sensor

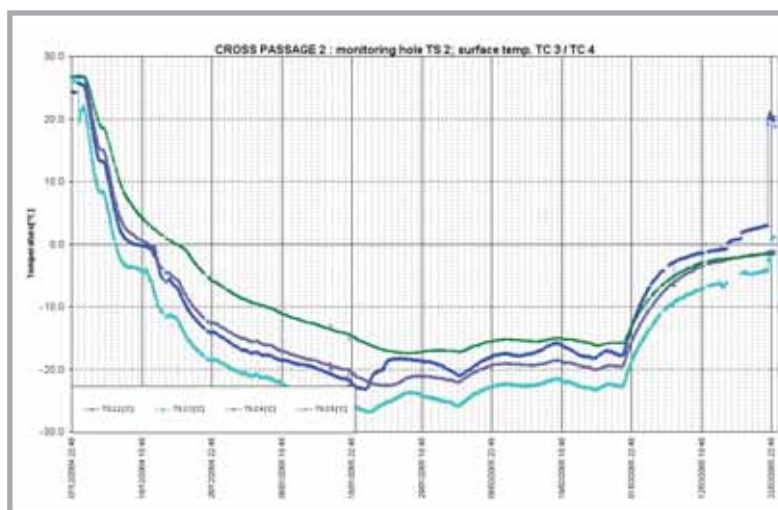


Figure 13
Mesures directes
des sondes TS2
Direct
measurements
by the TS2 sensors

Figure 14
Impact
des conditions
de bord
*Impact of onboard
conditions*

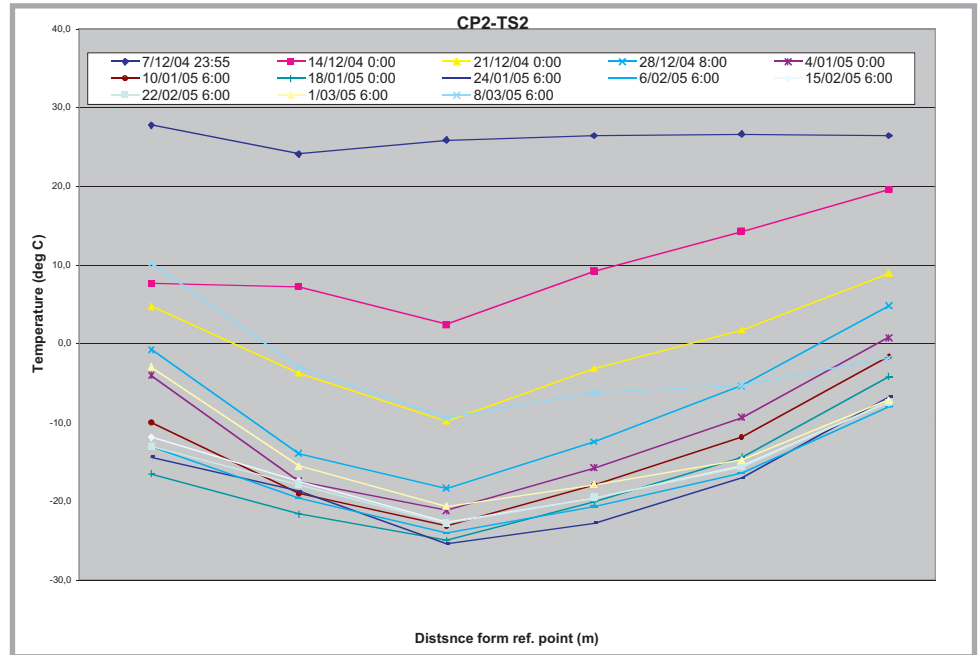
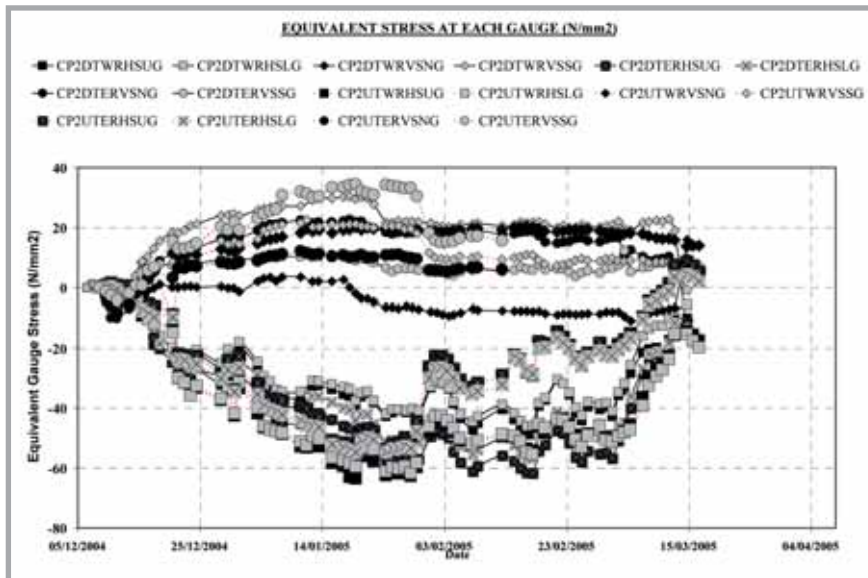


Figure 15
Contraintes
dans les cintres
de renfort
des tunnels
principaux
*Stresses
in the reinforcing
arches of the main
tunnels*



types de mesures, convergences optiques et jauges de contrainte dans les cintres ont permis de suivre au jour le jour les efforts et les déformations. Les essais de gonflement avaient proposé des coefficients de gonflement de 25 % par rapport au gonflement théorique de la phase liquide. Cela donnait des convergences de 7 mm et des contraintes dans les cintres de 60 MPa. Ils étaient surdimensionnés afin de sécuriser les tunnels principaux en cas de résultats d'essais trop favorables. Les contraintes ont progressé de façon quasi linéaire pendant la phase de mise en froid, puis se sont stabilisées pendant la phase d'excavation enfin ont régressé pour atteindre le zéro pendant la phase de décongélation. Cela a permis de confirmer les valeurs d'essais et de valider qu'aucun effort n'était emprisonné dans la structure (figure 15).

LES TRAVAUX

Les travaux de préparation ont commencé le 18 septembre 2004, la congélation le 8 décembre 2004, l'excavation le 17 janvier 2005, le revêtement principal le 10 février 2005. Le tunnel fini a été transféré aux équipes de pose de voie le 15 avril 2005. Les travaux se sont échelonnés entre les trois inter-tubes afin d'optimiser les équipes et les cadences. Ils ont pris en compte l'arrêt obligatoire correspondant aux festivités du nouvel an chinois, la seconde semaine de février 2005 (photo 1).

Les forages ont été réalisés sous sas étanche. Un essai à pression réduite s'est soldé par une rupture de sol immédiate et a montré ainsi le caractère dangereux des travaux dans le rocher décomposé sous forte pression d'eau.

Les tunnels principaux ont été protégés contre les mouvements inhérents à la congélation par des

Photo 1
Nacelle
de forage
Drilling platform





Photo 2
Cintre et protection thermique des zones sous congélation
Arch and thermal protection of frozen areas

cintres circulaires contreventés. Une double protection thermique a été appliquée contre le parement et autour des cintres afin de minimiser les échanges avec l'air ambiant. Elle est montrée sur la photo 2.

L'excavation, la pose de l'étanchéité et le revêtement permanent ont été réalisés de façon traditionnelle à l'abri de l'eau et des poussières et le matériau qui montrait sa texture rocheuse a présenté des caractéristiques idéales pour l'abattage, des résistances instantanées de 5 à 10 MPa, des plans de foliation et aucune eau libre. Le chantier est resté sec pendant toute la durée ce qui a donné une impression générale très favorable.

L'étanchéité a été l'objet de soins, de développements et d'expérimentations spécifiques afin d'assurer une continuité parfaite entre les voussoirs à joint conjugué des tunnels principaux et la membrane des inter-tubes. Une triple protection a été mise en place aux points critiques ce qui a permis d'assurer des éléments étanches et des conditions favorables de bétonnage du revêtement permanent. La décongélation s'est faite naturellement et en douceur. Les simulations numériques indiquaient un retour à zéro très rapide et une traversée du point de congélation lente. Le suivi des températures et des contraintes a montré qu'il en était bien ainsi.

Les travaux sous congélation ont l'énorme avantage de ne pas modifier la texture du sol et de laisser au sol en place une perméabilité identique à celle qui existait avant travaux. L'effet de barrage, si néfaste aux travaux souterrains et si difficile à juguler après coup, n'existe pas (photos 3 et 4).



Photo 3
Excavation
Excavation

L'utilisation de tunnelier à confinement permet de traverser les couches géologiques les plus diverses et les conditions hydrogéologiques les plus difficiles. Ils ont permis de repousser les limites pratiques de la construction des ouvrages souterrains mais posent très sérieusement la question des traitements aux extrémités et aux points singuliers nécessaires pour construire hors confinement. Etanchéité, résistance, déformations et interaction avec les tunnels principaux sont les questions clefs. Le projet de Lok Ma Chau a montré que la congélation était une réponse pratique et efficace à cette question.

■ CONCLUSIONS

La traversée de l'écosystème de "Long Valley" à Hong Kong s'est effectuée sans la moindre intervention en surface, et sans le moindre impact sur l'environnement, l'écologie, l'agriculture. Le programme de construction n'en a pas souffert, la qualité des travaux et leur sécurité non plus. La congélation appliquée aux trois inter-tubes a montré qu'elle était une technique sûre, que les mesures correspondaient parfaitement aux calculs et qu'une démarche globale essais/études/contrôle permettait de maîtriser le développement du traitement. Une fois les travaux terminés, le bloc de sol congelé disparaît et ne laisse plus dans le sous-sol que très peu de traces limitées aux tubes et leur scellement. Il n'y a ainsi ni impact sur l'hydrologie, ni altération de l'agriculture.

Le pari engagé à la signature du marché a été tenu



Photo 4
Etanchéité
Waterproofing

et le groupement d'entreprises est fier de la solution trouvée et de sa maîtrise. Au-delà du pari technique et écologique, la congélation a montré qu'elle était une solution à bien des problèmes nouveaux créés par l'utilisation des tunneliers à pression de confinement.

PARTENAIRES DU PROJET

Client et maître d'œuvre
Kowloon Canton Railways Corporation

Entreprise générale
Bouygues TP et Dragages HK

Entreprises spécialisées
IBJV - Intrafor Hong Kong Leader

Développement projet
Bouygues TP + Arup HK

Etudes de la congélation
Bouygues TP - Bureau d'études

Etudes de sols et expertise
GCG London & Hong Kong

Etudes du tunnel et inter-tubes
Bouygues TP - Bureau d'études

Etudes des ouvrages extérieurs
Arup Hong Kong

Contrôle indépendant
Atkins China Ltd

ABSTRACT

Ground freezing in the tropics. Experience of the Lok Ma Chau tunnels in Hong Kong

O. Martin, R. Storry, G. Cachia, B. Kitzis, R. Hasle, J.-L. Pégon

Ecology and Environment form a key element of project. They question the impact of works and their nuisances. Do we know how to build without any impact at surface level? Can we work underground without polluting the aquifers? Without noise and without dust? An answer is provided by the construction of the Lok Ma Chau tunnels in Hong Kong, and the crossing of the protected plain of Long Valley. The works involve two parallel tunnels of 7,625 m internal diameter and three cross-passages of 4,0 m internal diameter. They are built in residual soil under 25 m of water pressure. This article describes the definition and construction of the three cross-passages thanks to freezing of the ground.

One full year of development and coordination, four months of preparatory works have allowed digging, water-proofing and lining of the three cross-passages within a limited 4 weeks. Works anticipated three years before have been performed within programme and the final handover of the completed tunnel to the permanent way contract was on time just after completing of the cross-passages.

RESUMEN ESPAÑOL

Congelación de los suelos en los trópicos. Experiencia de los túneles de Lok Ma Chau en Hong Kong

O. Martin, R. Storry, G. Cachia, B. Kitzis, R. Hasle y J.-L. Pégon

La protección de las zonas ecológicas sensibles plantea el problema del impacto y de las contaminaciones de las obras. ¿Se sabe ejecutar obras sin el menor impacto en superficie? ¿Se sabe trabajar en subterráneo sin contaminar las capas freáticas? ¿Sin polvo ni ruido? Una respuesta se obtiene por la construcción de los túneles de Lok Ma Chau y la travesía del ecosistema de "Long Valley" en Hong Kong. Se trata de dos túneles paralelos de 7,625 m de diámetro interior y de tres

tubos intermedios de 4,0 m de diámetro interior construido en los suelos residuales bajo 25 metros de agua. En el presente artículo se expone el desarrollo y la construcción de los tres tubos intermedios bajo congelación.

Un año de desarrollo y de coordinación, cuatro meses de obras preparatorias han permitido excavar, ejecutar la hermeticidad y el revestimiento permanentes en menos de cuatro semanas. El programa de obras desarrollado en los tres años anteriores durante el inicio del proyecto fue respetado y la entrega del túnel a los equipos de tendido de vías se ha hecho en su debido plazo con la finalización de los trabajos de los tubos intermedios.

Le tunnel de Sinard A51 - Coynelle/Col du Fau



La section Coynelle/Col du Fau constitue le deuxième tronçon de la liaison autoroutière Grenoble/Col du Fau, maillon de l'itinéraire A51 Grenoble/Sisteron. Elle fait suite au premier tronçon Grenoble/Coynelle mis en service en juillet 1999 et sera normalement ouverte à la circulation au printemps 2007. Elle achèvera la section autoroutière de 26 km concédée à la société les Autoroutes Rhône-Alpes (AREA).

Cette nouvelle réalisation d'A51 s'inscrit dans le savoir-faire acquis depuis plus de trente ans, principalement pour relier les grandes agglomérations Rhône-Alpines, qui participera, au-delà de la technique, à l'essor économique, environnemental et sociétal des Alpes du Nord.

Les hypothèses de conception retenues pour ce tronçon s'appuient sur la réussite d'intégration paysagère et architecturale reconnue pour les 16 premiers kilomètres en exploitation.

Le tunnel de Sinard dont les concepteurs et les réalisateurs vont présenter le déroulement dans les chapitres qui suivent en est un exemple concret.



Marc Guilloud
DIRECTEUR DE LA CONSTRUCTION
AREA

La section Coynelle/Col du Fau, a son origine à Coynelle (commune de St-Martin-de-la-Cluze) au droit de l'extrémité provisoire de la section en service débouchant sur le carrefour giratoire avec la RN 75, à l'altitude d'environ 640 m NGF, et son extrémité au Col du Fau à l'altitude d'environ 900 m NGF où elle se raccordera par un

nouveau carrefour giratoire provisoire également sur la RN 75. La sortie provisoire de Coynelle sera supprimée, un demi-diffuseur sera créé sur le plateau d'Avignonet - Sinard, orienté vers Grenoble. La section peut se décomposer de la manière suivante :

- ◆ longueur 10,5 km : 6 km de plate-forme à 2 x 2

Jacques Martin
DIRECTEUR
DU PROJET A51
Scetauroute



Pierre Hingant
EXPERT, CHEF
DE PROJET TUNNEL
Scetauroute



Lucy Rew
INGÉNIEUR TUNNEL,
RESPONSABLE
DES TRAVAUX
Scetauroute

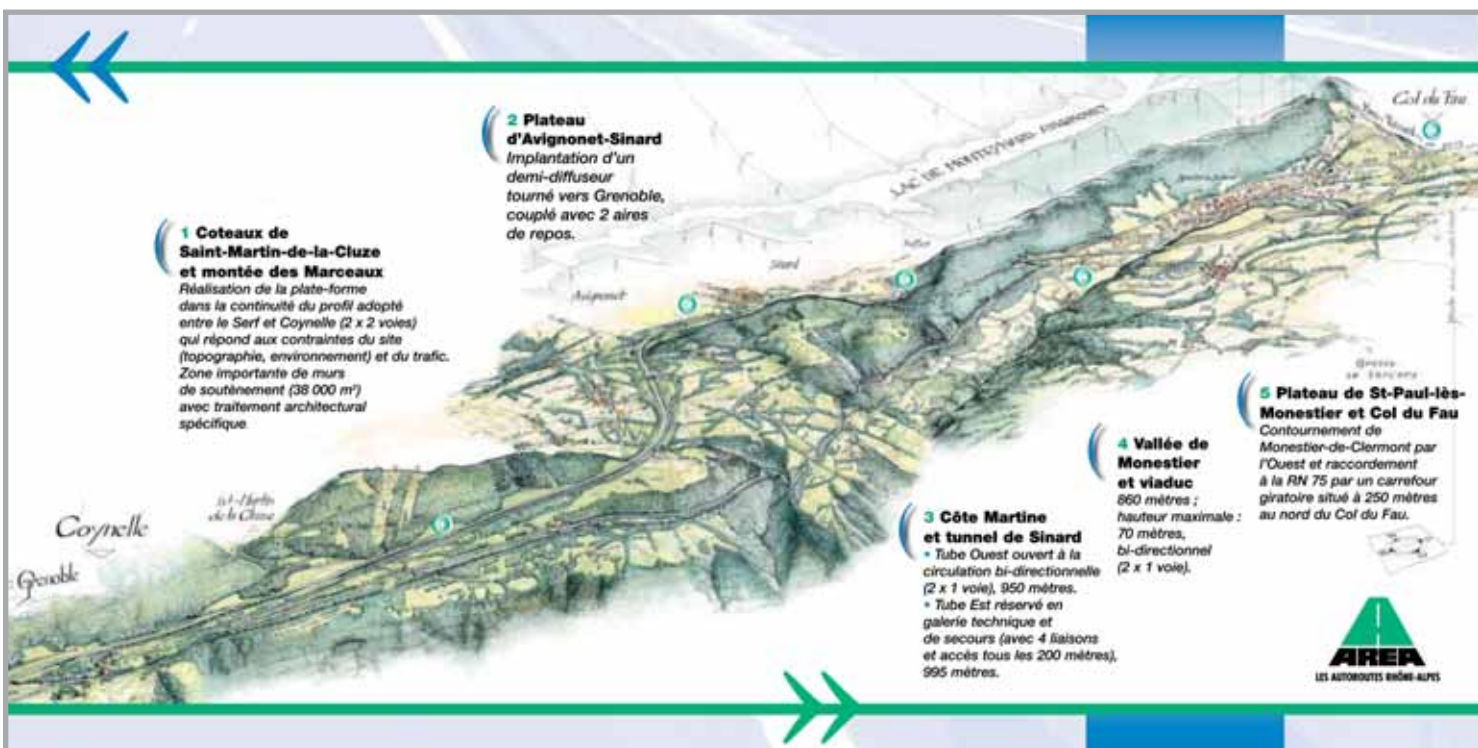


Pierre Goyet
DIRECTEUR
DU CHANTIER
Groupement Bec - Cari



Figure 1
Présentation de la section
Coynelle - Col du Fau

Description
of the Coynelle -
Col du Fau section



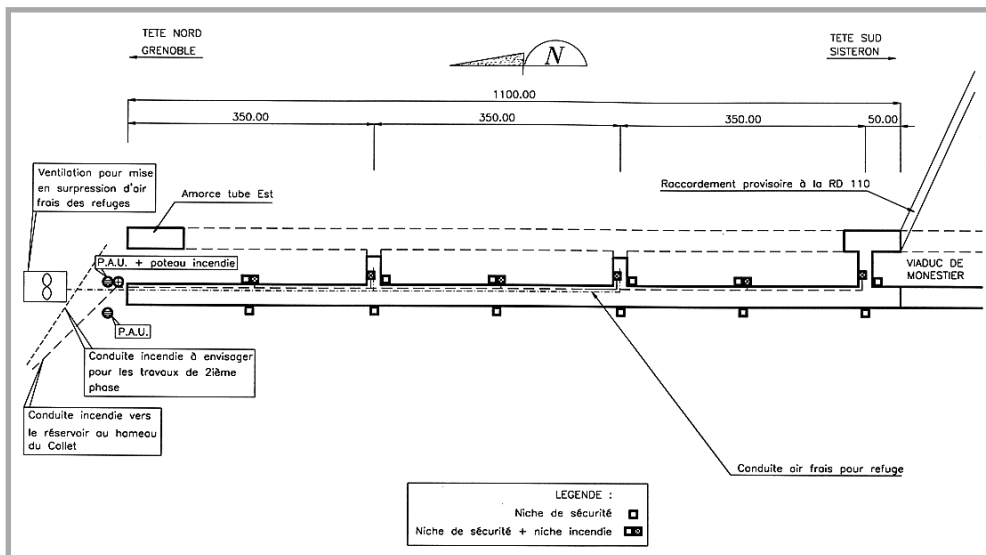


Figure 2
Synoptique
APASM 1997
APSM 1997
block diagram

voies, 2,5 km de plate-forme réduite à 2 x 1 voie (notamment au droit du tunnel et du viaduc), et 2 km à 2 x 1 voie plus une voie spéciale poids lourd dans la rampe après le viaduc en direction du sud ;

- ◆ six communes traversées : St-Martin-de-Cluze, Avignonet, Sinard, Monestier-de-Clermont, St-Paul-le-Monestier, Roissard ;
- ◆ trois ouvrages d'art exceptionnels : le tunnel de Sinard (tube exploité 950 m), le viaduc de Monestier-de-Clermont (860 m), les murs de soutènement (46 000 m²) ;
- ◆ onze ouvrages d'art courants qui rétablissent les communications, aussi bien routières, hydrauliques que biologiques.

Le coût d'objectif de cette infrastructure est de 180 millions d'euros entièrement financé par AREA, maître d'ouvrage et concessionnaire désigné par l'Etat (figure 1).

La complexité de l'opération A51 Nord résulte des différentes techniques de réalisation qu'il faut mettre en œuvre pour rendre possible ce projet, où toutes les contraintes liées à l'altitude, à la géologie des sols rencontrés, à la climatologie, à l'hydraulique, à l'environnement, à l'exploitation future de l'autoroute doivent être prise en compte.

Le tunnel de Sinard qui permet de passer du bassin versant du Drac au bassin versant de la Gresse en franchissant le massif du Sinard dit de la côte Martine avec une couverture de 160 m s'illustre bien dans cette définition.

En effet le tunnel de Sinard est un ouvrage évolutif, il comporte deux tubes reliés entre eux par quatre galeries espacées de 200 m ; trois d'entre elles sont exclusivement destinées aux piétons, la quatrième étant aussi accessible aux véhicules légers. Long de 950 m, le tube ouest accueille une chaussée permettant une exploitation en mode bidirectionnel (2 x 1 voie). Le tube Est (995 m) est exploité dans un premier temps en galerie technique et de secours ; ultérieurement, dès lors que les niveaux de trafic le nécessiteront, le second tube pourra être achevé et mis en circulation.

Le tunnel de Sinard débouche au sud directement sur le viaduc de Monestier-de-Clermont franchissant la vallée du Fanjaret. Le coût prévisionnel total de cet ouvrage est de 39 millions d'euros HT, dont 33 millions d'euros pour le génie civil (y compris les têtes) et 6 millions d'euros pour les équipements. Les dispositions arrêtées pour ce tunnel résultent d'un certain nombre d'itérations visant à optimiser le projet dès sa conception, pour intégrer les évolutions réglementaires relatives à la sécurité dans les tunnels routiers, et la nature géologique des terrains en amont et en aval de chacune des têtes.

■ ÉVOLUTION DE LA CONCEPTION

APSM de 1997

L'avant-projet sommaire modificatif (APSM) approuvé par décision ministérielle le 31 octobre 1997, proposait, compte tenu du trafic escompté, une réalisation phasée des ouvrages exceptionnels, que sont le tunnel de Sinard et le viaduc de Monestier. Au stade de cette étude le tunnel a une longueur de 1100 m. La vitesse de référence est de 80 km/h. Etant donné la longueur du tunnel et le trafic attendu, une ventilation longitudinale est retenue. Seul le tube ouest est projeté, et le PL est en rampe vers le sud avec une pente faible de 0,74 %. Le gabarit est de 9,5 m en largeur et 4,5 m en hauteur. Comme pour les tunnels d'Uriol et Petit Brion, le Transport des matières dangereuses (TMD) dans le tunnel de Sinard doit être permis même en première phase d'exploitation bidirectionnelle. La tête nord comprend un ouvrage de tête de 85 m de long, fondé sur un radier contrevoûté dans des conditions difficiles du fait de moraines argileuses compressibles de forte épaisseur. A la tête sud la RD 110 est rétablie au-dessus d'A51. Cette tête est également complexe, et les travaux nécessitent plusieurs phases de déviations provisoires avant rétablissement définitif de la RD 110 au-dessus du tunnel.

Les travaux de la première phase comprennent :

- ◆ l'exécution de la totalité du tube mis en service (ouest) ;
- ◆ une amorce du tube Est à chaque tête, avec en tête sud un raccordement provisoire à la RD 110 et un by-pass entre les deux tubes ;
- ◆ deux futures galeries de communication intermédiaires aménagées en refuge et ventilées par une conduite d'air frais située sous la chaussée du tube ouest ;
- ◆ dans le tube ouest, des niches de sécurité, six sur chaque piédroit, espacées d'environ 175 m.
- ◆ des niches incendie (six poteaux disposés côté gauche dans le sens définitif de circulation) au même espacement que les niches de sécurité (figure 2).

APSM de 2000

Celui-ci intégrait les modifications demandées par les Services Techniques de l'administration lors de la réunion du 30 juillet 1999 (IGR/IGOA) :

- ◆ le changement du système de ventilation du tunnel bidirectionnel (1^{re} phase d'exploitation) avec passage d'une ventilation longitudinale à une ventilation semi-transversale ;
- ◆ la réduction de la largeur roulable de 9,5 m à 9 m ;
- ◆ la connexion des deux abris à la gaine de ventilation d'air frais pour l'évacuation des usagers ;
- ◆ la vérification des conditions de visibilité, en seconde phase d'exploitation unidirectionnelle, pour une vitesse des véhicules de 110 km/h.

En outre, le projet du tunnel devait prendre en compte les dispositions introduites par le projet de modification de la circulaire n° 81-109 du 29 décembre 1981, et son annexe "Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les tunnels routiers" version provisoire du 23 mai 2000, faisant suite à la catastrophe du tunnel du Mont Blanc (24 mars 1999), introduisant notamment le dossier de sécurité et le Comité d'évaluation de la sécurité dans les tunnels routiers (CESTR).

Le dossier de sécurité doit comprendre :

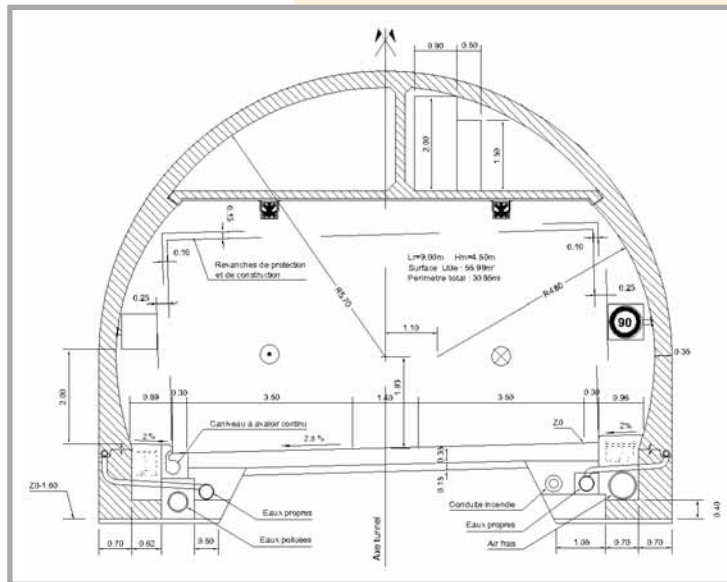
- ◆ une description du tunnel projeté et de ses accès, avec les plans nécessaires à la compréhension des dispositions d'exploitation prévues ;
- ◆ une étude prévisionnelle du trafic précisant et justifiant le régime envisagé pour le transport des marchandises dangereuses (TMD), avec une analyse des risques correspondants ;
- ◆ une notice précisant et justifiant les dispositions d'exploitation prévues au regard des exigences de sécurité (ESD) ;
- ◆ l'avis d'un expert ou d'un organisme qualifié en matière de sécurité des tunnels.

L'approbation de l'APOA ne peut avoir lieu qu'après avis du CESTR sur le dossier de sécurité.

Conséquences sur le tunnel de Sinard (évolution par rapport à l'APSM de 1997)

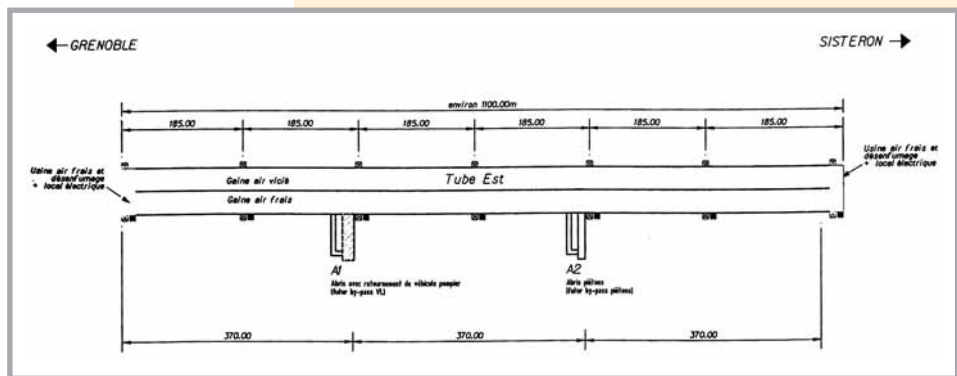
Les principales conséquences du projet de circulaire sur le tunnel de Sinard dans le cas d'un passage transversal sont les suivantes :

- ◆ interdiction du système de ventilation longitudinale pour un tunnel bidirectionnel de plus de 1000 m ;
- ◆ interdiction des abris "cul de sac" et nécessité d'avoir :
 - soit des abris avec évacuation des personnes par la gaine d'air frais (cas d'une ventilation semi-transversale), avec obligation d'assurer une résistance au feu HCM 120 (N2) de la dalle de ventilation et une température maximale de 60° C en surface de la dalle "circulée" au bout de 120 minutes ;



Figures 3 et 4
Solution 1 : tunnel bidirectionnel avec ventilation semi-transversale, deux usines et deux abris (tous les 370 m) reliés à la gaine d'air frais pour l'évacuation des usagers

Solution 1 : two-way tunnel with semi-transverse ventilation, two air plants and two shelters (every 370 m) connected to the fresh air duct for evacuation of the users



- soit des évacuations vers une galerie de sécurité avec interposition de sas ;

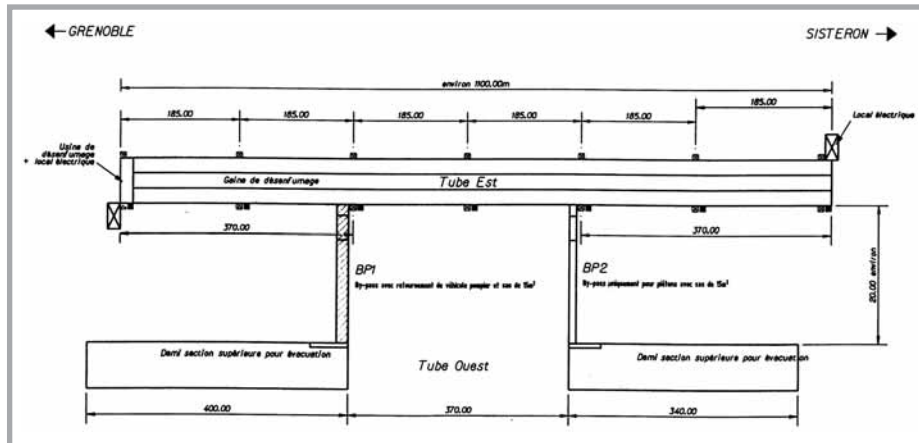
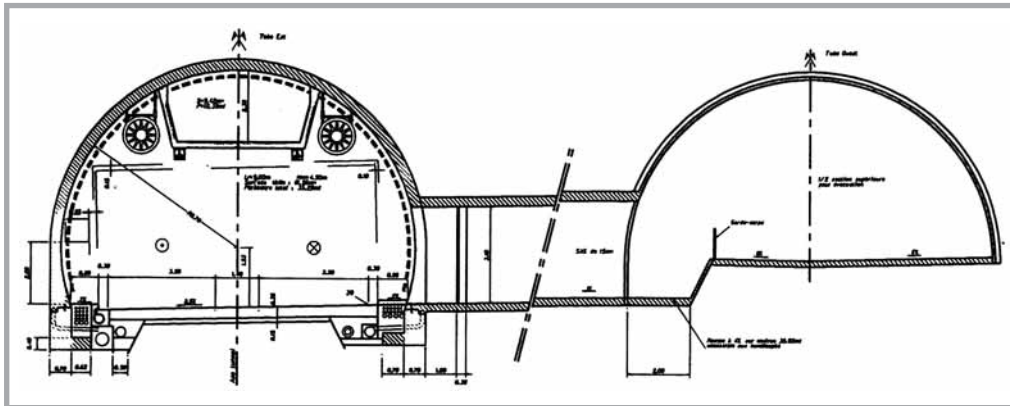
- ◆ les usines de ventilation devront présenter une résistance au feu N2 (HCM 120) du fait de l'évacuation des usagers par ces mêmes usines ou N3 (HCM 120 + CN 240) s'il y a un risque de perte de l'alimentation électrique ou des télécommunications dans la zone de l'incendie ;

- ◆ l'alimentation électrique principale (HT, BT) et les télétransmissions devront être protégées pour un niveau N3 tout au long du tunnel.

Ces dispositions nouvelles ont conduit les concepteurs à étudier quatre solutions, prenant en compte ces mesures (étude préliminaire ouvrage d'art août 2000). Si la longueur du tunnel est toujours de 1 100 m, il descend cette fois vers le sud avec une pente de 0,5 % et c'est le tube Est qui est construit pour être exploité en bidirectionnel. Le gabarit est de 9 m en largeur et 4,5 m en hauteur :

- ◆ **solution 1** : tunnel bidirectionnel avec ventilation semi-transversale, deux usines et deux abris (tous les 370 m) reliés à la gaine d'air frais pour l'évacuation des usagers (figures 3 et 4) ;

- ◆ **solution 2** : tunnel bidirectionnel avec ventilation longitudinale et désenfumage par une gaine, à partir d'une usine de ventilation située au nord, et évacuation des usagers par l'intermédiaire de deux rameaux connectés à la demi-section supérieure



Figures 5 et 6
Solution 2 : tunnel bidirectionnel avec ventilation longitudinale et désenfumage par une gaine, à partir d'une usine de ventilation située au nord, et évacuation des usagers par l'intermédiaire de deux rameaux connectés à la demi-section supérieure du futur second tube, réalisée sur 370 m depuis chaque tête

Solution 2 : two-way tunnel with longitudinal ventilation and smoke control via a duct, from a ventilation plant located in the North, and evacuation of the users by means of two cross-passages linked to the upper half-section of the future second tube, executed over 370 m from each portal

du futur second tube, réalisée sur 370 m depuis chaque tête (figures 5 et 6) ;

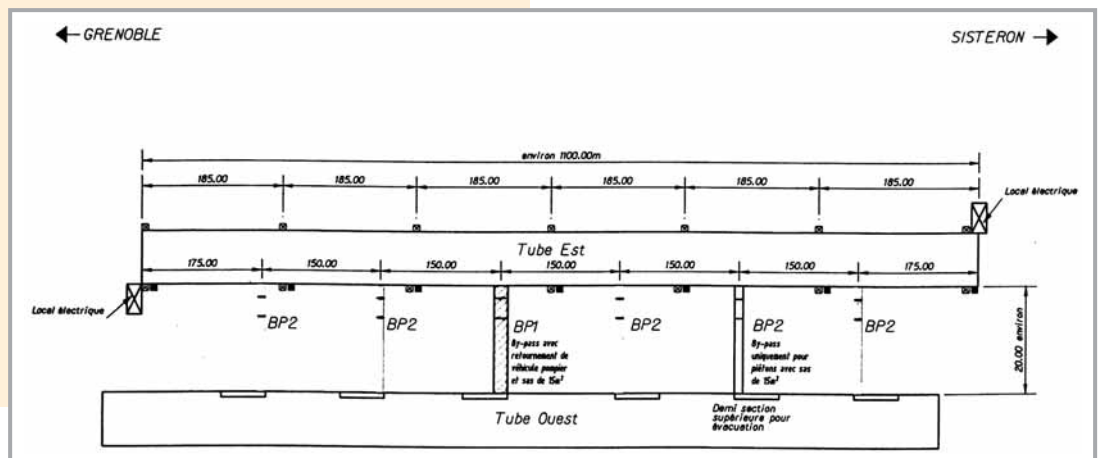
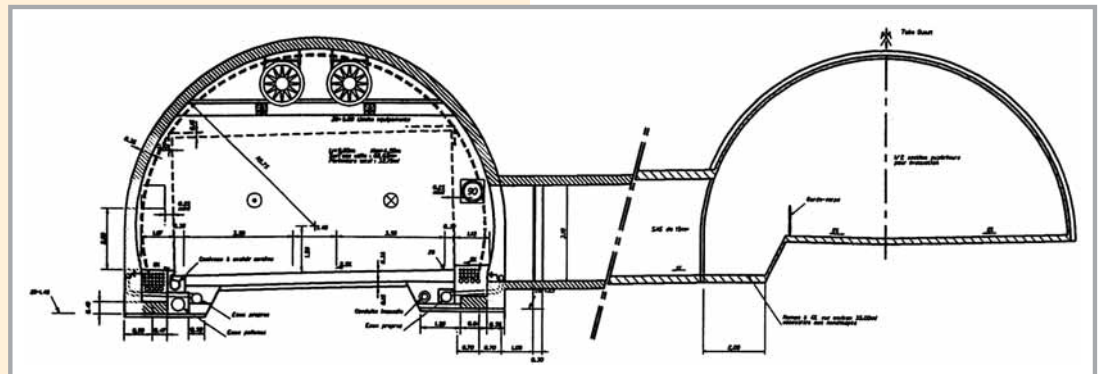
◆ **solution 3** : tunnel bidirectionnel avec ventilation longitudinale et évacuation des usagers par l'intermédiaire de huit rameaux (tous les 120 à 130 m) connectés à la demi-section supérieure du second tube, réalisée sur l'ensemble du tunnel (figures 7 et 8) ;

◆ **solution 4** : tunnel avec deux tubes unidirectionnels avec ventilation longitudinale et deux by-pass (un VL et un piétons) avec sas. Pas de phasage transversal (figures 9 et 10).

Comparaison des quatre solutions

Une analyse multicritères de ces quatre solutions a été menée, prenant en compte la sécurité des usagers en cas d'incendie, l'investissement en première phase et l'investissement différé, a conduit le maître d'ouvrage AREA à retenir la solution 3. Toutefois, il est apparu que cette solution dérogeait au projet d'instruction technique (05/2000 - Version 14) qui n'autorise la ventilation longitudinale avec mesures compensatoires que pour des tunnels de longueur comprise entre 500 et 1000 m. C'est ainsi qu'une **solution 5**, identique dans son principe à la solution 3, mais calée sur un profil en long retravaillé permettant de réduire non seulement la longueur du tunnel à moins de 1000 m, avec by-pass tous les 200 m (mesure compensatoire) ainsi que la pente sur le viaduc de Mones-

Figures 7 et 8
Solution 3 : tunnel bidirectionnel avec ventilation longitudinale et évacuation des usagers par l'intermédiaire de huit rameaux (tous les 120 à 130 m) connectés à la demi-section supérieure du second tube, réalisée sur l'ensemble du tunnel
Solution 3 : two-way tunnel with longitudinal ventilation and evacuation of the users by means of eight cross-passages (every 120 to 130 m) linked to the upper half-section of the second tube, executed over the entire length of the tunnel



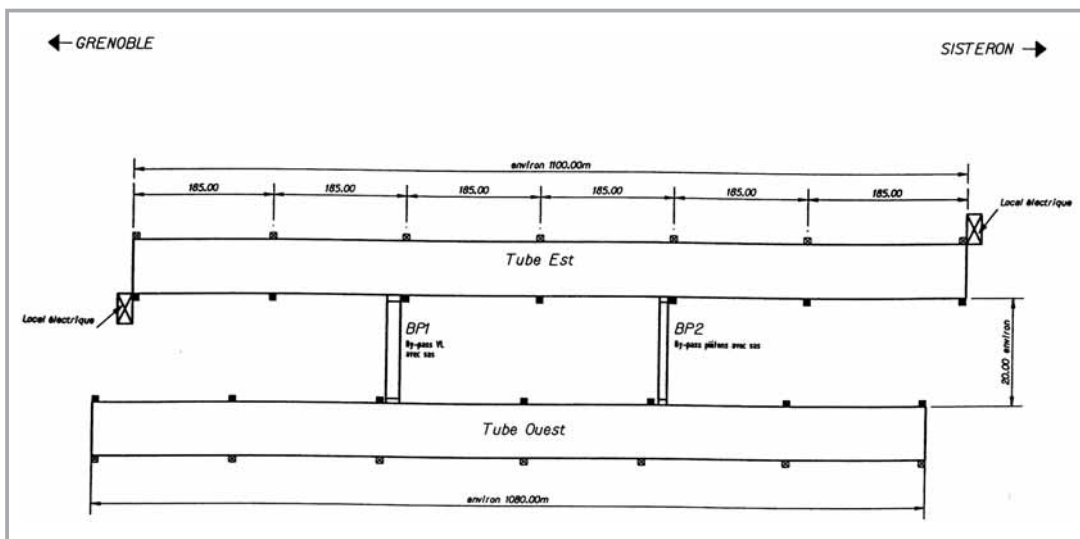
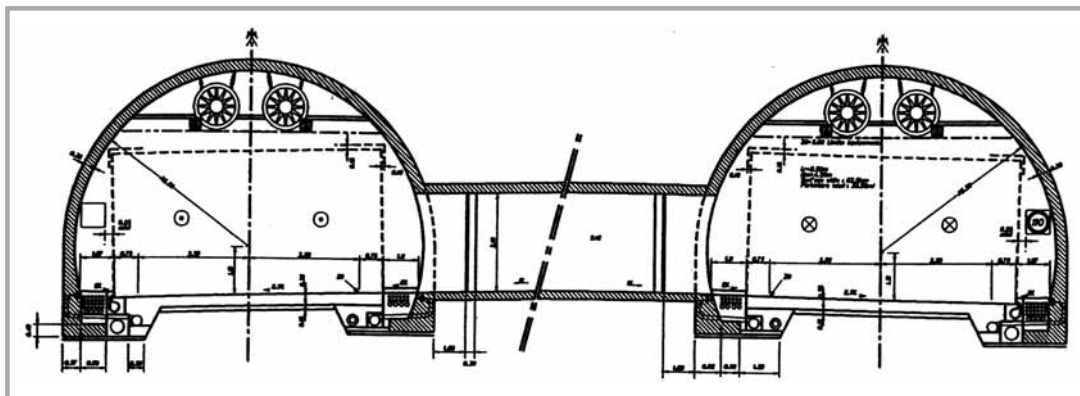
tier, a été acceptée par AREA et présentée dans le dossier d'APSM qui a été validé lors de la réunion du 24 janvier 2001 à la Direction des Routes. Cette solution 5 a été développée et le dossier de sécurité correspondant a été soumis au CESTR le 25 septembre 2001. Les principales observations faites ont été prises en compte dans le dossier d'APOA approuvé qui définit toutes les dispositions relatives au tunnel de Sinard en cours de réalisation (figures 11 et 12).

LE PROJET

Tracé en plan

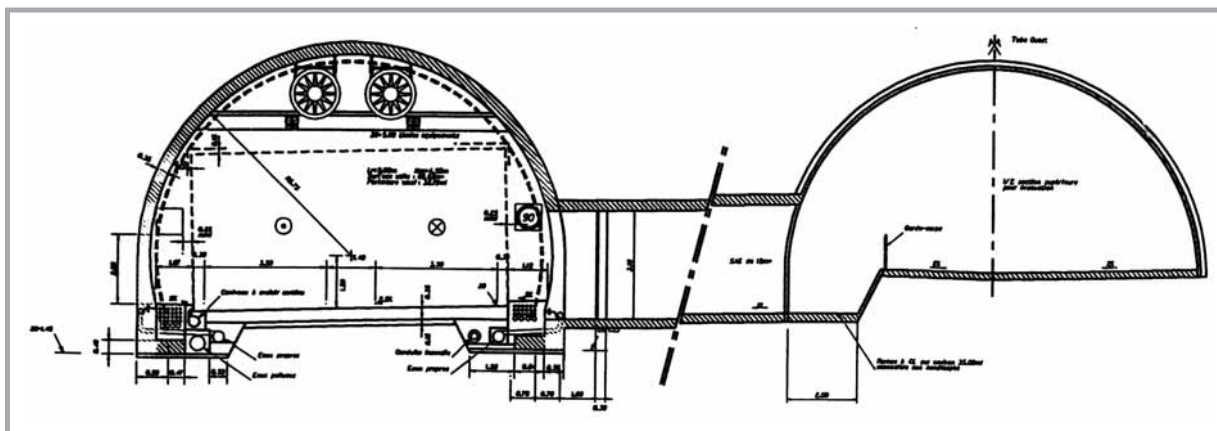
Pour chacun des deux tubes, le tracé en plan, en S, est défini par :

- ◆ tube Ouest :
 - longueur 964 m,
 - cercle de rayon 1 150 m,
 - deux clothoïdes,
 - cercle de rayon 1 250 m ;
- ◆ tube Est :
 - longueur 995 m,
 - cercle de rayon 1 400 m,
 - deux clothoïdes,
 - Cercle de rayon 1 200 m.



Figures 9 et 10
Solution 4 : tunnel avec deux tubes unidirectionnels avec ventilation longitudinale et deux by-pass (1 VL et 1 piétons) avec sas. Pas de phasage transversal

Solution 4 : tunnel with twin one-way tubes with longitudinal ventilation and two bypasses (1 for commercial vehicles and 1 for pedestrians) with air lock. No scheduling of subsequent phases



Figures 11 et 12
Coupe type et synoptique de la solution 5

Typical cross section and block diagram of solution 5

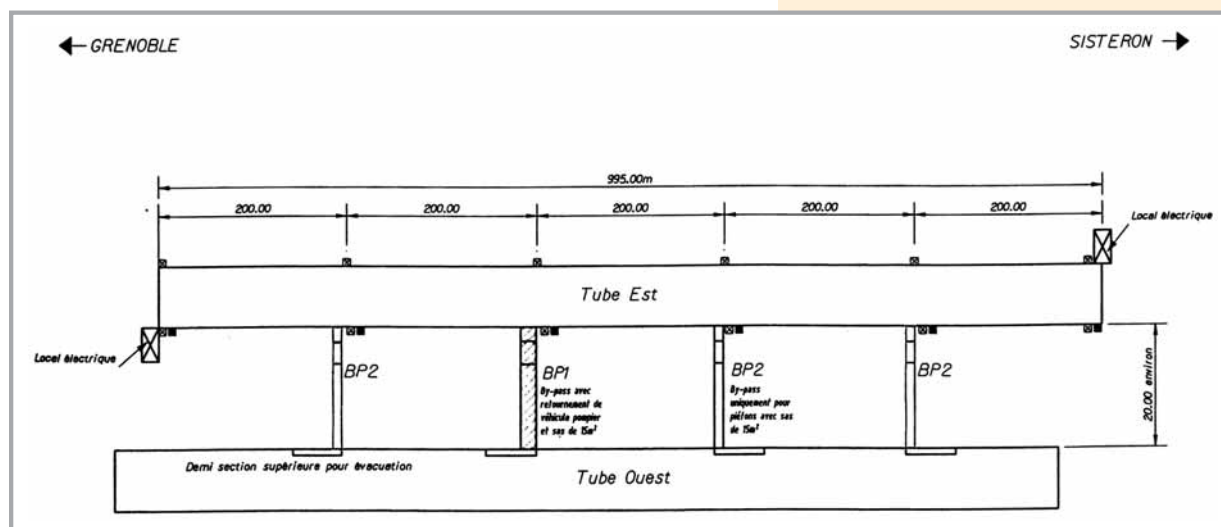


Figure 13
Coupe type
du tunnel de Sinard
*Typical cross section
of the Sinard tunnel*

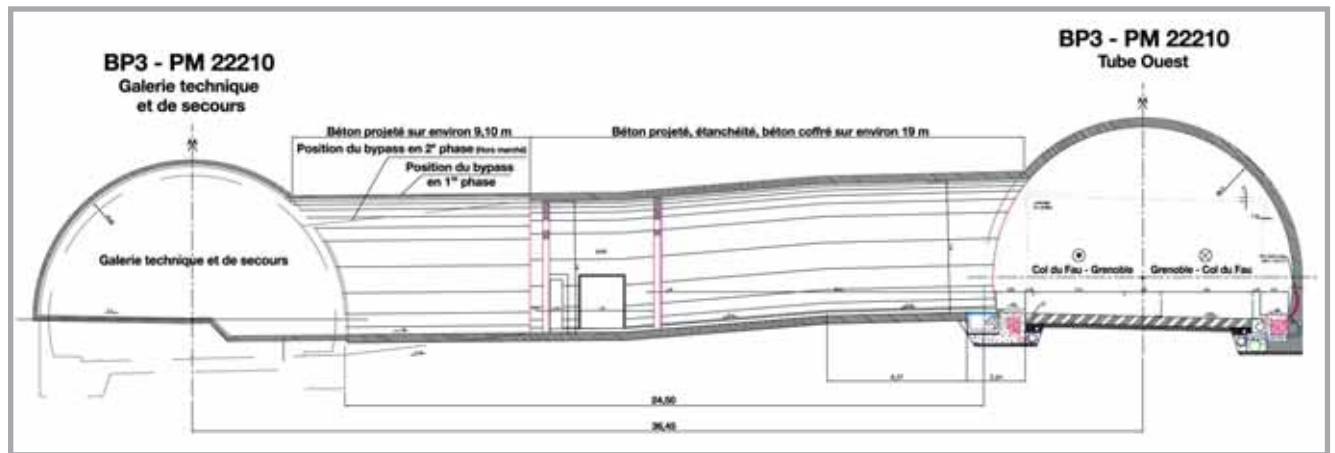


Photo 1
Coupe réelle
transversale tube
ouest
*Actual cross section
of the western tube*



► Profil en long

Le profil en long du tunnel a été rehaussé pour réduire non seulement sa longueur, mais également dans le but de ramener la rampe sur le viaduc de Monestier-de-Clermont de 5,4 % à 1,5 %. Les conséquences pour le tunnel sont que sa pente est inversée, elle monte vers le sud à 1,5 %, recommandant de réaliser en première phase le tube ouest. Les caractéristiques de raccordement sur la section courante sont imposées par le rétablissement de la RD 110 F en passage inférieur à la tête nord ainsi que la réduction de la hauteur des remblais à mettre en œuvre aux abords de cette tête. En tête sud les contraintes sont liées à la transition tunnel-viaduc, pour ménager une plateforme intermédiaire servant également de refuges et indispensable pour l'exploitation hivernale du viaduc, au rétablissement de la RD 110 et à l'accès des services de secours en cas de nécessité.

Le tube Est, réalisé en seconde phase, présente une pente de 1,5 % à 2 %, créant ainsi un léger décalage des chaussées en tête nord. Cette disposition permet en particulier de minimiser la hauteur

des remblais à mettre en œuvre sur sol compressible au-delà de la tête nord (cf. *Travaux* n° 819, pages 76 à 78, mai 2005).

Profil en travers

Le tube ouest, réalisé accueille une largeur roulable de 9 m permettant une exploitation en mode bidirectionnel (2 x 1 voie), décomposée en :

- ◆ bande dérasée de gauche de 0,3 m ;
- ◆ chaussée de 3,5 m ;
- ◆ séparateur central de 1,4 m (matérialisé par bandes blanches) ;
- ◆ chaussée de 3,5 m ;
- ◆ bande dérasée de droite de 0,3 m.

Il est associé à une galerie technique et de secours constituée par la demi-section supérieure du tube Est à laquelle il est relié par quatre by-pass, espacée de 200 m dont trois d'entre eux sont exclusivement destinés aux piétons, le quatrième étant accessible aux véhicules léger (exploitation, secours...) (figure 13 et photo 1).

■ GÉNIE CIVIL DES OUVRAGES
LIES À LA SÉCURITÉ
ET À L'EXPLOITATION

L'évacuation des usagers se fait par l'intermédiaire des quatre by-pass reliés à la galerie technique et de secours. Les by-pass sont équipés de sas et mis en surpression par rapport au tunnel. Le radier provisoire de cette galerie de sécurité est constitué par un béton compacté (BCA) sur la moitié de sa largeur, assurant la circulation des véhicules d'exploitation et de secours.

Chaque tête est pourvue d'un local technique abritant un réservoir d'eau destiné à l'alimentation du réseau incendie, un local pompes, et des locaux électriques.

La ventilation longitudinale

Un système de désenfumage dit "longitudinal", qui vise à contrôler les fumées pour les pousser à l'extérieur du tunnel. Huit batteries (14 accéléra-

teurs de fumée) sont installées en voûte du tunnel, distantes entre elles de 80 m. Séparés du tube en circulation par des portes coupe-feu, la galerie technique et de secours (tube Est) et les quatre by-pass sont également équipés de ventilateurs destinés à les "surpressuriser", afin d'éviter une éventuelle pénétration des fumées.

Des niches de sécurité tous les 200 m

Espacées de 200 m, les niches de sécurité sont munies d'un poste d'appel d'urgence et d'extincteurs. Des équipements de contrôle de l'atmosphère (un analyseur d'oxyde de carbone, de dioxyde d'azote et un opacimètre estimant la densité de fumée contenue dans l'air) équipent certains by-pass.

La détection automatique d'incident (DAI)

Les quatorze caméras vidéo installées dans le tunnel de Sinard (douze à l'intérieur et deux aux têtes) sont équipées du système de détection automatique d'incident (DAI) qui, en cas d'arrêt d'un véhicule dans le tunnel notamment, déclenche automatiquement une alarme au CESAR, le PC de circulation d'AREA, situé à Aiguebelette.

Fermeture d'urgence

Des barrières sont en place aux entrées du tunnel. Pilotées depuis le CESAR, elles peuvent interdire l'accès au tunnel si la situation l'exige. Côté sud, une barrière sera également installée à l'entrée du viaduc de Monestier-de-Clermont pour éviter que des véhicules stationnent sur cet ouvrage.

Capture des pollutions accidentelles ou des hydrocarbures

Le tunnel de Sinard bénéficie d'un système d'assainissement constitué d'un caniveau avaloir qui collecte les eaux de chaussée, en particulier celles issues du lavage du tunnel, mais qui peut aussi recueillir les matières polluantes ou dangereuses pouvant être répandues accidentellement. Les liquides sont dirigés vers un bassin de confinement de 200 m³ situé en tête nord. Des regards siphoniques relient directement ce système au collecteur d'assainissement principal, ce qui permet d'éviter la propagation d'un incendie par des hydrocarbures.

Signalisation, liaisons radio et informatique

Le tunnel intègre des dispositifs plus généraux, comme les panneaux de signalisation, les liaisons radio et informatique nécessaires à AREA, à la Gen-

darmerie et aux services de la sécurité civile, ainsi qu'à la réception de Rhônealp¹, la radio 107.7 FM des autoroutes alpines.

■ GÉOLOGIE

Le massif rocheux du Sinard, dénommé également "Côte Martine", se présente sous la forme d'un éperon orienté nord-sud, de faible largeur (600 à 700 m). Il appartient géographiquement aux "Collines Bordières", qui longent le versant occidental du massif alpin.

Les structures géologiques générales et les caractéristiques géomécaniques des matériaux apparaissent relativement bien connues¹ dans leurs grandes lignes :

- ◆ le massif traversé par le tunnel du Sinard est constitué d'un ensemble lithologique monotone de calcaires quartzo-argileux lités, orientés grosso modo nord-sud et présentant un pendage général moyen de 60° vers l'ouest ;

- ◆ ce massif est affecté par plusieurs failles sub-verticales orientées d'une part, est-ouest, et d'autre part, nord-sud, ce dernier cas étant nettement défavorable pour l'excavation (directions pratiquement parallèles) ;

- ◆ les failles (nombreuses dans ce massif fracturé, puisque six sont reconnues) se présentent sous deux faciès très différents selon leur orientation, soit un faciès de roche schistosée tectoniquement plus ou moins friable (failles orientées nord-sud, épaisseur 5 à 10 m), soit un faciès de roche fracturée et/ou brechifiée (failles orientées est-ouest, épaisseur 1 à 3 m), parfois avec une matrice argileuse. Une faille majeure ancienne orientée N025 (F1/F6) existe pratiquement parallèle au tracé, ainsi que des failles plus récentes perpendiculaires au tracé, F3 et F5. La faille F1/F6 tangente le tube ouest par l'ouest. Lors de l'analyse des risques du projet, des soutènements lourds ont été prévus pour traverser ces passages.

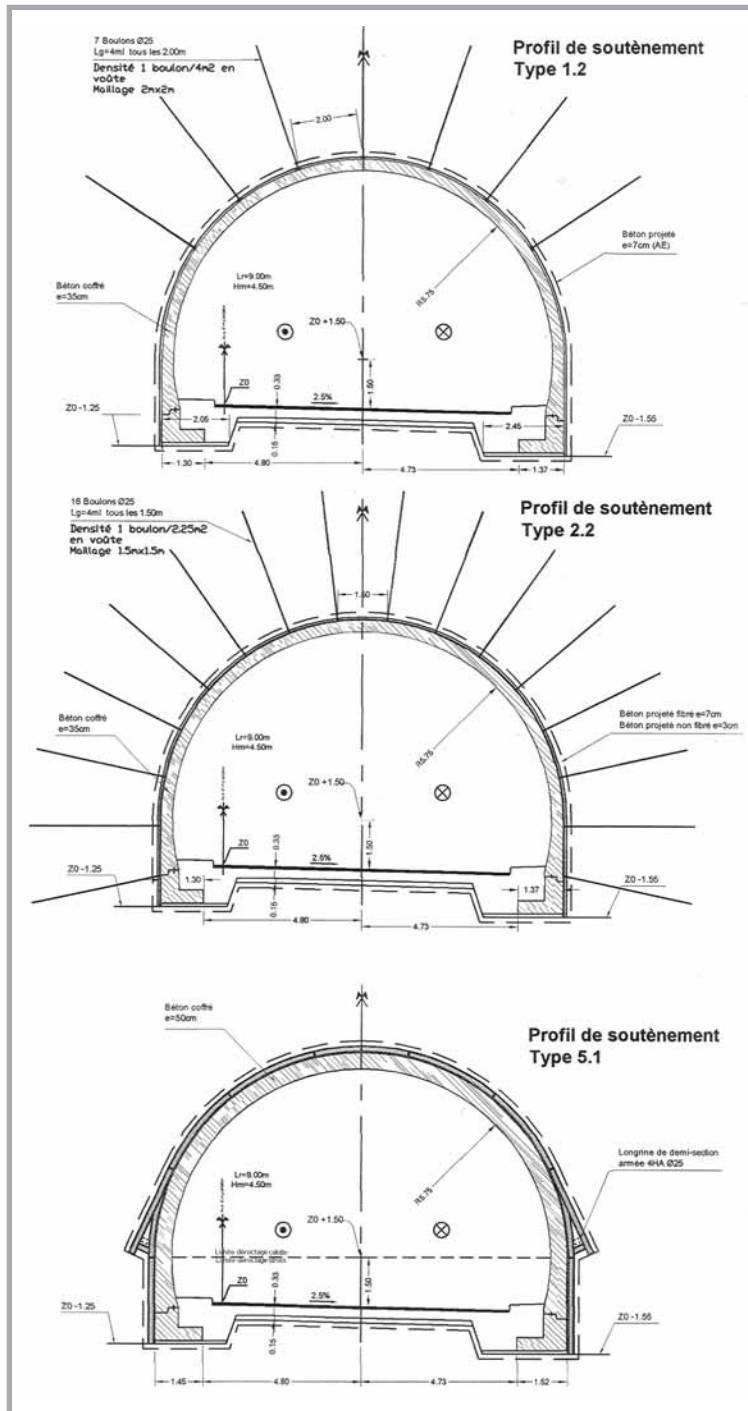
Au niveau des têtes, la roche est saine au nord, recouverte par des éboulis et des moraines argileuses compressibles. Au sud, la roche est tectonisée, sub-affleurante avec des rapides et irrégulières variations d'altitude du toit, sous des éboulis argileux. La couverture maximale, dans la zone centrale du tunnel, est d'environ 160 m.

Trois ensembles géomécaniques ont été définis, conduisant à trois profils types de soutènements :

- ◆ type 1.2 : léger, à base de béton projeté, associé à des boulons d'ancrage, 1 unité/4 m² ;
- ◆ type 2.2 : moyen, à base de béton projeté, as-

1. De nombreuses reconnaissances ont permis de figer le projet et d'appréhender ses difficultés : celles du CETE de Lyon en 1989/1990 pour formaliser l'APS, puis celles pilotées par le département géomécanique de Scetauroute en relation avec les experts tunnels lors des campagnes de 1994/1996 et 2000/2001.

Figure 14
Profils types
de soutènement
Typical support
profiles



- ▶ associé à des boulons d'ancrage, 1 unité/2,25 m² ;
- ◆ type 5.1 : lourd, à base de cintres HEB 180 à oreilles avec blindages et béton de bourrage. Ce soutènement est prévu appliqué par demi-section, en deux phases (figure 14).

ARCHITECTURE ET PAYSAGE

Le cabinet Jourda et les cabinets de paysagiste Viollet et Agence des Paysages ont été associés au projet dès la conception pour conserver la continuité architecturale et paysagère de cette opération sur les deux sections autoroutières. La notion du tube virtuel chère à l'architecte-conseil du maître d'ouvrage a été reconduite. Les têtes du tunnel sont équipées de casquette en forme de sifflet semblable à celles des tunnels d'Uriol et Petit Brion de la section précédente.

Les murs de la tête nord sont pourvus de jardinières en terrasses naturelles en forme de cirque permettant de respecter la noue naturelle formée par le talweg du Fanjaret (figures 15, 16 et photo 2). A l'entrée sud, la casquette est en forme de sifflet inversé. La géométrie des murs reprend l'inclinaison des discontinuités naturelles du calcaire. L'architecte-conseil du maître d'ouvrage s'est inspiré de la géologie existante sur le tunnel ferroviaire de la Motte en contrebas de l'autoroute. Pour renforcer cette notion d'inclinaison des calcaires altérés par les argiles, les parements des murs sont décalés et le béton d'interface a été noirci par pigmentation.

Le matricage des parements des murs a fait l'objet d'une étude approfondie pour essayer d'être le plus représentatif possible de la fracturation et de la couleur des calcaires existants (figure 17 et photo 3).

ENVIRONNEMENT

Le chantier se situe dans un contexte environnemental sensible. Le maître d'ouvrage AREA a imposé qu'un ingénieur spécialisé en environnement soit présent pendant tout le déroulement de l'opération et que lors de la phase travaux il soit l'interlocuteur qualifié des responsables des marchés pour garantir le respect des engagements pris. A ce titre une notice environnement spécifique faisait partie des hypothèses de chaque consultation à partir de laquelle les entreprises adjudicatrices devaient établir leur Plan d'assurance du respect environnemental (PAE). En outre deux arrêtés préfectoraux étaient annexés au Cahier des clauses administratives particulières (CCAP), l'un concernant les ouvrages hydrauliques (dit "loi sur l'eau" et spécifique aux travaux d'A51) avec le but de minimiser l'impact du chantier sur l'état de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques, l'autre concernant le bruit (plus général et incombant à tous travaux dans le département de l'Isère). Parallèlement au démarrage des travaux un dossier "Bruits de chantier" demandé par AREA a été instruit avec les services de la préfecture et les communes concernées par les travaux. Le village de Sinard et le hameau du Collet de Sinard qui se trouvent dans un rayon très proche de la tête nord ont bénéficié des mesures particulières décrites dans ce dossier pendant la phase travaux.

ALLOTISSEMENT DES TRAVAUX

Têtes et accès

Les travaux ont commencé en juillet 2002 avec un premier marché concernant les terrassements et soutènements des têtes nord et sud. A l'issue d'une

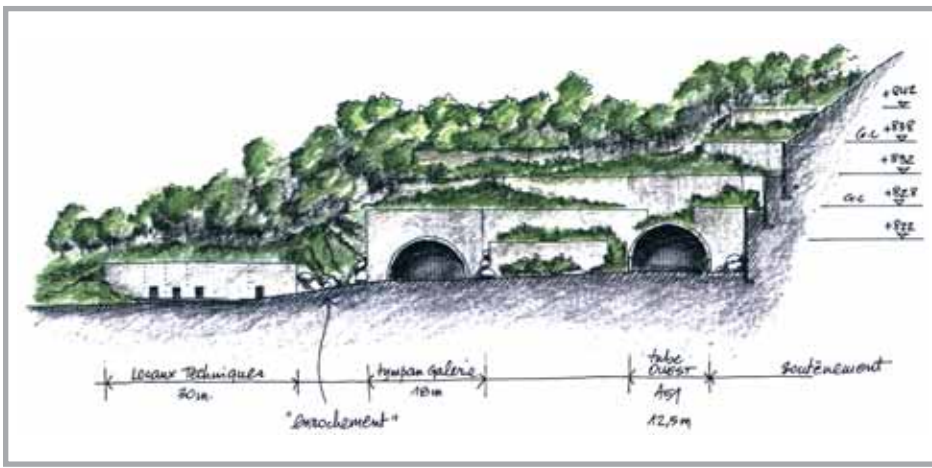


Figure 15
Concept architectural
de la tête nord
*Architectural concept
of the northern portal*

Figure 16
Tête nord archi
*Northern portal,
architecture*

consultation le marché a été notifié par AREA au groupement Bianco (mandataire) - Carron-Secorail RTS - Eurovia Alpes. Il comprenait une tranche ferme relative à la tête nord et une tranche conditionnelle pour la tête sud. Ces travaux ont été achevés en décembre 2003. La stratégie de démarrage anticipée de ces travaux, devait permettre la réalisation des têtes d'attaque de creusement au nord tout en réutilisant les matériaux de déblai et de marinage pour le préchargement de la zone compressible du talweg du Merdaret (cf. *Travaux* n° 819, pages 75 à 87). La nécessité de la tranche conditionnelle pour les travaux de préparation de la tête sud était conditionnée par la décision ministérielle d'engager les travaux pour cette section. Le montant des deux tranches s'élève à 4 millions d'euros HT.

Génie civil tunnel

Le marché du génie civil du tunnel a été notifié, après consultation européenne restreinte, au groupement Bec (mandataire) - Cari pour un montant de 29 millions d'euros HT. Le délai d'exécution de 26 mois, y compris deux mois de préparation, court depuis le 17 septembre 2003. Un délai partiel est prévu pour libérer la tête sud, et la mettre à la disposition du groupement chargé de la construction du viaduc.

■ PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

La réalisation des travaux souterrains devait prendre en compte un environnement humain et naturel particulièrement sensible et les concepteurs avec le maître d'ouvrage y ont attaché une grande importance, notamment :

- ◆ au voisinage de la tête nord qui correspond à l'attaque principale du tunnel, la RD 110 F, le hameau du Collet de Sinard, le ruisseau du Merdaret et le village de Sinard ;
- ◆ au-dessus du tunnel sur le massif de Sinard, une conduite de transport de gaz éthylène (l'autoroute l'intersecte à plusieurs reprises plus au nord) ;
- ◆ à la tête sud la RD 110, très fréquentée par un trafic local, mais qui est surtout la voie de délestage de la RN 75 en cas d'incidents. Puis la voie SNCF à 100 m et la RN 75 Grenoble/Sisteron à 150 m environ.



Photo 2
Vue
de la tête nord
*View of northern
portal*

L'organisation du chantier et les méthodes d'exécution devaient être adaptées à ces contraintes par le groupement.

Concernant le bruit, les tirs de mines en tête nord étaient interdits en dehors de la plage horaire 7 heures - 22 heures (en dérogation à l'arrêté préfectoral qui prévoyait 20 heures) sur les deux cents premiers mètres. Le brise-roche hydraulique, envisagé initialement par le groupement malgré les prescriptions contractuelles, a été abandonné pour cette phase des travaux.



Figure 17
Triptyque architectural de la tête sud. (1) Tunnel de la Motte. (2) Etude archi. (3) Le résultat !

Architectural triptych of the southern portal. (1) La Motte tunnel (2) Architectural design (3) The result !



Photo 3
Réalisation de la tête sud.
Murs

Execution of the southern portal. Walls

Par ailleurs, conformément au projet un merlon de protection phonique, a été réalisé en limite de plate-forme lors des premiers travaux, et a permis de limiter les bruits du chantier. La mise en dépôt provisoire du marinage s'effectuait selon un phasage très précis conforme aux dispositions décrites dans le dossier "bruits de chantier" visant à protéger notamment la nuit le village du bruit des *dumpers* dont les klaxons de recul avaient été remplacés par des radars de détection. Pendant toute la durée des travaux des mesures de bruit (sonomètres et géophones) ont été effectuées selon des implantations et des procédures définies par arrêté préfectoral. Concernant les vibrations induites par les tirs de mines, chaque tir faisait l'objet d'un enregistrement au moyen de géophones installés en des points stratégiques permettant de valider le respect des seuils réglementaires et d'adapter si nécessaire les plans de tir, étant précisé que l'amorçage séquentiel participant à la réduction des nuisances était également imposé par le marché.

Les eaux de foration et de ruissellement ne pouvaient être rejetées dans le milieu naturel qu'après avoir transité par des bassins provisoires de dé-

cantation et déshuilage. Les engins de marinage devaient franchir un bassin de débouage avant de traverser la voirie locale. La qualité des eaux rejetées à chaque tête, ainsi que par la zone d'installation de chantier comprenant la centrale à béton, était régulièrement contrôlée, par des prélèvements avec analyses effectuées par un laboratoire agréé. Au niveau de la circulation de chantier, au croisement avec la RD 110F ou de la RD 110, la signalisation a été renforcée et un éclairage de sécurité a été mis en place. La priorité a toujours été donnée aux usagers des routes par rapport au transit des travaux. En complément des dispositions prises pour ne pas souiller les voiries départementales une balayeuse aspiratrice était opérationnelle dans le cadre des marchés travaux.

Enfin, sur proposition du maître d'œuvre une centrale à béton autonome et dédiée a été installée à proximité immédiate du tunnel. Un choix contractuel dicté par une double exigence : préserver les voiries locales en évitant la circulation de camions approvisionnant le béton et assurer 24 heures sur 24 l'alimentation en béton du chantier de soutènement en moindre nuisance.

■ TRAVAUX DE CREUSEMENT ET SOUTÈNEMENT

Ils ont été conduits essentiellement à partir de la tête nord constituant l'attaque principale. Une attaque secondaire par la tête sud était limitée à une cinquantaine de mètres. L'excavation au brise-roche hydraulique a permis de s'affranchir des contraintes imposées au minage (créneaux horaires de tir, projections, vibrations) du fait de la RD 110, de la ligne SNCF, et de la RN 75.

A partir de la tête nord, le creusement de la galerie technique et de sécurité (demi-section supérieure du tube Est) et du tube ouest (en pleine section) a été conduit simultanément, en excavation "bitube" (tableau I).

Le groupement a mis en œuvre les moyens suivants :

◆ personnel :

- 12 mineurs par poste de 8 heures,
- une équipe de marinage de 4 à 6 conducteurs d'engins à la demande,
- une équipe de 5 à 6 hommes en charge des travaux arrière, servitudes et maintenance des engins et installations.

L'activité continue sur 24 heures impliquait trois postes de 8 heures. L'avancement 6 jours par semaine a conduit le groupement à mobiliser quatre équipes (trois équipes en activité pour une équipe en repos) ;

◆ matériel :

- forations, minage et boulons : deux robofores trois bras sur porteur AMV (Robodrill) équipés de perforateurs hydrauliques HC 80 (photo 4),

- marinage : un chargeur sur chenille CAT 963 capacité godet 2,5 m³ + quatre tombereaux A25 ou A35 (photo 5),
- béton projeté : un robot de projection Putzmeister + un robot de projection Normet,
- purges et reprofilages : deux pelles (20 et 40 t) sur chenilles + fraise et BRH,
- servitudes : deux nacelles lourdes Merlot + érecteur de cintres et plate-forme de chargement + deux nacelles légères (photo 6),
- mesures de convergence : un tachéomètre TCM 1800 Leica,
- contrôle du profil excavé : un profilomètre Amberg AMT 4000,
- implantations courantes et guidage : un tachéomètre TCRA 1103 Leica.

Avancement de l'excavation

Avancement par volées de 2,80 à 5 m selon la qualité des terrains rencontrés. Les tirs ont été réalisés en pleine section dans le tube ouest sur 90 % de la longueur. Après leur mise au point initiale, les plans de tir ont dû être régulièrement adaptés pour prendre en compte les fréquentes évolutions de comportement du rocher, et les vitesses particulières induites. Au total, 23 plans de tirs différents ont été utilisés.

Le rendement inégal des explosifs dans les zones de terrain fracturé et hétérogène a nécessité d'importants reprofilages du front après chaque tir. Ils

Tube ouest	Longueur excavée = 940 ml Section excavée = 94 m ²	Principales quantités mises en œuvre	Déblais en tunnel	164 000 m ³
Tube est	Longueur excavée = 955 ml Section excavée = 61 m ²		Nombre de volées	521
By-pass*	Nombre 4 Section excavée 64 m ²		Volées courantes	Longueur = 4 m
			Quantité totale explosif	180 t
			Boulons	141 t
			Cintres et blindage	303 t
			Béton projeté	8 000 m ³
			Béton de voûte	50 000 m ³
			Murs de tête	5 500 m ²

*Le groupement a proposé de les réaliser tous de même section pour optimiser son matériel de coffrage et permettre des circulations plus aisées tant en phase de creusement que de d'étanchéité et bétonnage des voûtes. Les trois by-pass piétons ont leur section réduite par des cloisons en BA.

Tableau I

Table I



Photo 4
Robofore en foration
Robofore during boring

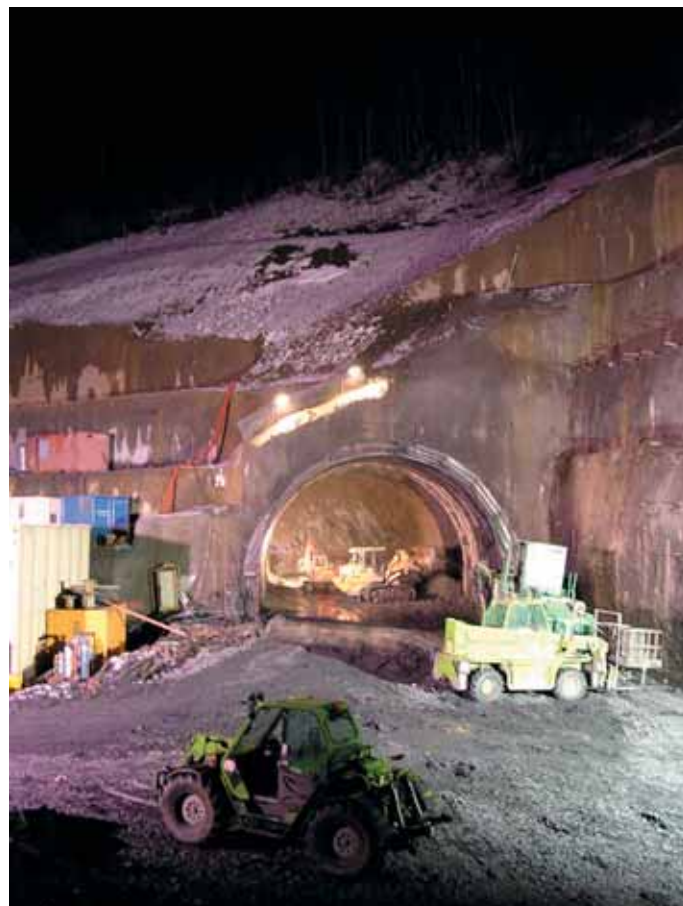


Photo 5
Travaux de terrassement
tête nord
Earthworks
at the northern
portal



Photo 6
Pose de cintres
Placing arches

Figure 18
Plan de tirs
Blasting plan

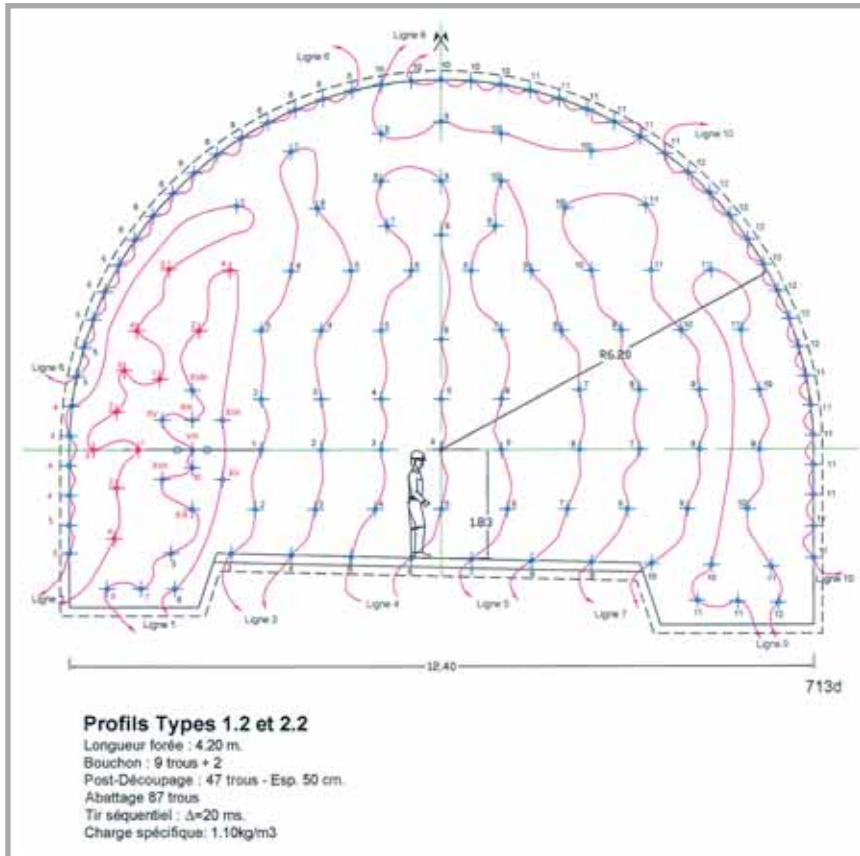


Tableau II
Table II

Profil	Volume (ml)	Avancement (ml/jour)
Profil 5.1	71,45 ml	0,82 ml/jour
Profil 2.2	379,52 ml	4,10 ml/jour
Profil 1.2	489,00 ml	5,20 ml/jour

Figure 19
Programme des travaux de creusement
Tunnel driving work schedule



ont été réalisés au moyen d'un marteau brise-roche hydraulique de 3 t (figure 18).

Les avancements moyens réalisés pour chacun des profils types du tube ouest sont reportés sur le tableau II.

Le percement des deux tubes est intervenu en décembre 2004, soit 13 mois après le premier tir déclenché le 17 novembre 2003. Le programme de la figure 23, conforme à la réalisation, met en évidence la zone la plus difficile rencontrée entre les PM 200 et 280 du tube ouest. Suite au désordre apparu dans les piédroits entre les PM 200 et 230,

deux mois ont été nécessaires pour franchir cette zone au moyen d'importants renforts des soutènements (utilisation des profils en cintre lourds) (figure 19).

Ventilation en phase travaux

Puissance totale installée : ~ 550 kW

Pour chaque tube : une amenée d'air frais diamètre 2 000 mm.

Une gaine d'aspiration des gaz et fumées de tir diamètre 1 600 mm.

Soutènement

En concertation avec la maîtrise d'œuvre et en respect des objectifs définis par le maître d'ouvrage lors de la mise au point du marché, le groupement a proposé d'optimiser les soutènements en évitant un recours trop systématique à des cintres lourds. Pour satisfaire cet objectif dans le respect de la sécurité le maître d'ouvrage a mis en place un contrôle extérieur indépendant dans le cadre d'une mission confiée au CETE de Lyon : groupe géotechnique. L'efficacité du boulonnage a été appréciée lors d'essais comparatifs réalisés à l'avancement entre :

- ◆ boulons HA25 scellés au mortier ;
 - ◆ boulons HA 25 scellés à la résine ;
 - ◆ boulons à action immédiate de type Swellex.
- Les boulons Swellex MN16 de longueur 4 m se sont révélés comme parfaitement adaptés au calcaire quartzo-argileux. Leur utilisation a donc été généralisée dans les terrains courants, en dehors des zones faillées ou tectonisées nécessitant des boulons au mortier.

Dans les zones affectées par des déformations importantes, des renforts ont été réalisés au moyen de boulons HA 25 ou 32 de 6 ml, scellés au mortier, associés à du treillis soudé et une couche supplémentaire de béton projeté.

Béton projeté

Le soutènement courant à front est constitué d'une à deux couches de béton projeté fibré (fibres Dramix RC 65/35). Il est complété en arrière par une couche de 3 cm de béton projeté non fibré pour protection de l'étanchéité.

Réalisation des by-pass

Le projet comprenait trois by-pass piétons et un by-pass VL, de 27 m de longueur en moyenne. Ils ont été excavés à l'avancement, en section VL pour permettre notamment la circulation des engins dans les deux tubes.

Pour éviter le recours à des soutènements lourds, leur implantation définitive n'a été arrêtée qu'après reconnaissance de terrains favorables à partir de chaque tube.

Béton compacté de radier (BCR)

En phase creusement, un radier en béton compacté a été réalisé sur toute la longueur du tube ouest.

La possibilité de circuler dans les quatre by-pass a permis sa mise en œuvre en pleine largeur en cinq opérations de 200 m. Chaque opération a été précédée d'une mise à la cote terrassement au marteau brise-roche, de purges mécaniques manuelles et du nettoyage soigné à l'air comprimé de toute la surface.

Réutilisation des matériaux

Tous les matériaux extraits ont été mis en dépôt provisoire sur une plate-forme située dans l'assiette de l'autoroute en tête nord du tunnel et selon un phasage précis lié à la consolidation des moraines argileuses. Ils ont été repris dans le cadre du marché TOARC pour la réalisation de remblais et de modelages (cf. *Travaux* n° 819, pages 75 à 87).

■ ÉTANCHÉITÉ ET REVÊTEMENT DE BÉTON COFFRÉ

Ces travaux ont été engagés après percement du tube ouest et achèvement du béton compacté de radier selon le phasage suivant :

◆ **béton des banquettes** : après réglage des terrassements et nettoyage des fonds de banquettes, la fondation de la voûte a été réalisée au moyen de deux coffrages métalliques de 11 m et d'une équipe de cinq maçons coffreurs.

Le calepinage des banquettes est rigoureusement identique à celui de la voûte ;

◆ **contrôle gabarit - Reprofilages - Réception support** : ces opérations sont réalisées devant l'atelier d'étanchéité. Elles sont indispensables pour garantir l'épaisseur nominale du béton de revêtement et la qualité du support de l'étanchéité. Le contrôle du gabarit a été réalisé à l'aide du portique de pose d'étanchéité, équipé de lames souples rayonnantes positionnées par le géomètre du chantier ;

◆ **étanchéité** : l'étanchéité d'extrados, mise en œuvre par l'entreprise GCC, comprend :

- des bandes drainantes Delta MS en pied de voûte et, à la demande, dans les zones humides,
- un géotextile de protection de 600 g en zone courante et 1 000 g en zone cintrée,
- géomembrane PVC translucide 20/10^e,
- des renforts PVC positionnés à chaque arrêt de béton, assurant une protection au contact du masque (photo 7) ;

◆ **bétons de revêtement du tube ouest** :

- personnel : deux équipes de six maçons coffreurs,
- matériel : une pompe à béton mobile 90 m³/h ; un coffrage outil métallique (fournisseur C.M.C.), longueur 11 m sur portique motorisé. Peau métallique e = 10 mm, vibration pneumatique haute fréquence du coffrage.

Avec le type "précontraint" retenu, la poussée du béton est intégralement reportée sur le portique par l'intermédiaire de vérins hydrauliques.



Photo 7
Etanchéité à l'intersection tunnel/by-pass
Waterproofing at the tunnel/by-pass intersection



Photo 8
Coffrage en tunnel
Shuttering in the tunnel

Cette option permet d'éliminer les ancrages dans les banquettes (photo 8) ;

◆ **béton de voûte** : environ 50 000 m³ de béton type C 25/30 XC2 dosé à 280 kg/m³ de CEMI 52,5 ES + 50 kg de cendres volantes.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Parements tympan : 950 m²
 Parements lisses : 2 400 m²
 Parements matricés coulés en place : 450 m²
 Murs préfabriqués matricés : 4 500 m²
 Bétons : 5 200 m³
 Armatures : 275 t

Photo 9
Coffrage
en tête nord

*Shuttering
at the northern portal*



Photo 10
Tête sud
Southern portal



- ▶ Résistance minimale nécessaire au décintrement : 8 MPa.
- ▶ Délai de décintrement : 12 à 15 heures (12 heures minimum).
- ▶ Cadences de bétonnage : 40 à 50 m³/heure.
- ▶ Nombre de plots en souterrain : 85 réalisés à la cadence d'un plot/jour avec un coffrage outil.
- ▶ Les bétons de revêtement commencés fin janvier sont achevés depuis le 1^{er} juillet 05 ;
- ▶ **◆ béton de tête du tube ouest** : les ouvrages de tête du tunnel sont des structures en béton armé, réalisées à l'air libre, mais à l'aide du coffrage outil utilisé en souterrain. Pour la tête nord, des coffrages métalliques d'extrados ont été nécessaires

à la construction d'un tube en béton armé, rappelant les têtes des tunnels d'Uriol et Petit Brion (photo 9).

■ GÉNIE CIVIL DES MURS DE TÊTE

Présentation

Les entrées nord et sud du tunnel sont caractérisées par des talus de grande hauteur (environ 30 m), traités en parois clouées. Ils sont habillés par des murs en béton armé à parements architectoniques matricés (cf. analyse architecturale et paysagère) (photo 10).

En tête sud, ces murs sont inclinés à 60°. En tête nord, ils sont verticaux disposés en gradins. La matrice utilisée, "Cheyenne" de Soceco Reckli, rappelle la stratification et la texture des calcaires argileux du massif du Sinard. Au marché il était prévu, soit d'utiliser cette matrice du commerce, soit de réaliser un "moulage" d'un élément répertorié sur les calcaires naturels du tunnel de la Motte. C'est le choix de la matrice du commerce qui a été retenu par la direction du projet pour l'ensemble des marchés de cette section autoroutière afin de conserver un langage commun A51 "facile" à reproduire ultérieurement si nécessaire...

Cet habillage comprend quatre types de murs :

- ◆ murs verticaux à parements lisses des tympans des têtes, d'une largeur d'environ 35 ml et d'une hauteur de 30 m, coffrés sur une seule face ;
- ◆ six murs (ou "écaillés") inclinés à 60° par rapport à l'horizontale, matricés, d'une hauteur de 30 m et largeur de 15 m, coffrés sur une seule face ;
- ◆ trois murs de soutènement double face en gradins au-dessus de la casquette nord, dont un en guillotine sur la casquette même, d'une hauteur de 6 m et 16 m de longueur ;
- ◆ dix murs verticaux matricés d'une hauteur variable de 4 à 15 m coffrés sur une seule face et de longueur pouvant atteindre 45 m.

Les murs coffrés sur une seule face assurent un rôle de soutènement à long terme des parois clouées. Ils sont constitués d'un panneau préfabriqué matricé et d'un béton de remplissage armé. Ils sont dimensionnés pour permettre, en cas de rupture d'un ancrage de la paroi, un report des efforts sur les ancrages voisins.

Les travaux ont été réalisés sur une période d'environ 10 mois. Ils n'ont pas été interrompus malgré les conditions extrêmes de l'hiver 2004/2005.

Techniques utilisées

Quatre méthodes distinctes ont été mises au point pour répondre aux spécificités architecturales et configurations très particulières du site :

- ◆ réalisation des tympans sud verticaux armés



Photo 11
Ferrailage tympan
sud-ouest
Reinforcement
of southwest spandrel

et coulés en place au moyen d'un ensemble de coffrages barrage une face, d'une hauteur de 2,60 m, permettant la réalisation de levées sur la pleine longueur de tympan (35 ml). Une équipe constituée de sept ouvriers assure les levées avec une grue à tour fixe d'une capacité de 6 t à 50 m. Le coffrage barrage est constitué de trois passerelles superposées : bétonnage, ferrailage et finitions (photo 11) ;

◆ réalisation en tête sud des murs inclinés en éléments matricés préfabriqués, option retenue pour garantir la meilleure qualité du parement. Les éléments préfabriqués de longueur moyenne de 7 m x hauteur 1,5 m x épaisseur 15 cm pèsent 4,5 t. Ils sont munis sur la face arrière de connecteurs permettant une liaison au béton de remplissage armé mis en place à chaque levée de 1,5 m. Ils sont posés au moyen de la grue à tour et de trois équipages mobiles de 1 t.

Les équipages sont déplacés par la grue. Ils sont constitués de trois passerelles de travail métalliques :

- une passerelle supérieure pivotante, basculant côté vide, pour permettre le guidage et la pose des éléments préfabriqués. En position abattue, elle permet de reprendre la poussée du béton de remplissage entre préfa et paroi,
- une passerelle intermédiaire permettant les réglages et arrimages de l'équipage sur des cônes d'ancrages fixés aux panneaux inférieurs,
- une passerelle inférieure de finition.

Ces équipages ont une géométrie modulable pour s'adapter aux longueurs variables des murs et élé-



Photo 12
Tympan sud-est
et mur préfabriqué
incliné
Southeast spandrel
and inclined prefabricated
wall

ments préfabriqués. Une équipe de six ouvriers assure la réalisation d'une levée par jour (photo 12) ;

◆ réalisation en tête nord des murs verticaux simple face avec la pose d'éléments préfabriqués de 7,5 m de hauteur maximum x 2 m de largeur x 15 cm d'épaisseur. Poids maximum 5,5 t.

La pose s'effectue à la grue à tour (capacité 6 t à 55 m) après mise en œuvre des armatures contre la paroi.

Les éléments matricés sont disposés verticalement. Ils sont munis également de multiples connecteurs diamètre 8 mm en face arrière. La pose s'effectue au rythme de huit panneaux par jour. Les panneaux sont butés en pied par une longrine. Deux étais tirant-poussant ancrés au terrain en tête reprennent

► la poussée du béton de remplissage. Ce bétonnage s'effectue par levée de 2 m de hauteur. Une équipe de six ouvriers assure l'ensemble des opérations :

◆ réalisation des murs double face matricés par technique courante avec des banches colisables ou en traditionnel sur la casquette nord. Des murs de hauteur supérieure à 6 m sont raccordés sur le contour elliptique de la casquette (mur biais par rapport à la casquette).

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage concessionnaire de l'opération A51 Grenoble/Col du Fau
AREA

Maître d'œuvre avec direction du projet, conception et suivi des travaux
Scetauroute

Groupement d'entreprises

Bec (mandataire) - Cari : réalisation des études d'exécution et des travaux

Sous-traitants

- Bétons (fabrication et transport) : SATM (Vicat)
- Plate-forme installation : Eurovia
- Etanchéité voûte : GCC
- Mesures vibrations : Idetec
- Locaux techniques : Josserand
- Terrassements à l'extérieur et B.C.R. : Pelissard
- Conduite incendie : Sade
- Armatures : S.A.M.T.
- Éléments préfabriqués des murs nord et sud : S.A.P.B.

- Laboratoire et contrôle externe : Sigma Béton
- Béton extrudé : Somaro

Principaux fournisseurs

- Atlas Copco : outils de foration et boulons Swellex
- Bruno Flli : cintres et tôles de blindage
- C.M.C. : coffrages voûte
- Cocentall : boulons HA et mortier de scellement - Coffrage by-pass
- Comefra : matériel foration robofore
- Kinsite : explosifs

ABSTRACT

A51 - Coynelle/Col du Fau.
The Sinard tunnel

J. Martin, P. Hingant, L. Rew, P. Goyet

The civil engineering works of the Sinard tunnel on the A51 motorway south of Grenoble, Coynelle/Col du Fau section, will soon be finished. They have been carried out in a particularly sensitive environment. The final design is the result of a number of iterations that had the objective of optimising the project, while incorporating the developments in legislation relating to safety in road tunnels.

RESUMEN ESPAÑOL

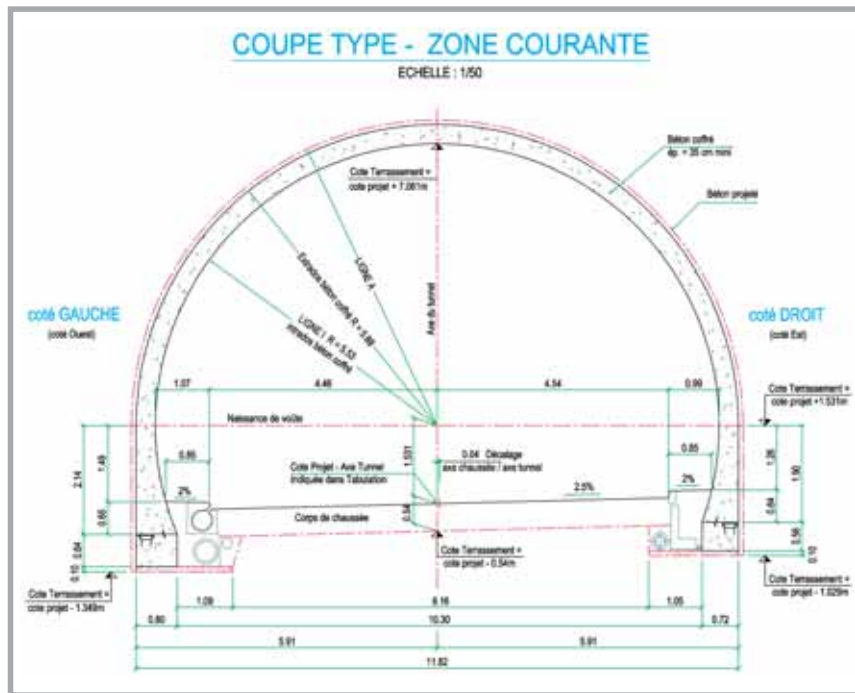
A51 - Coynelle/Puerto del Fau. El túnel de Sinard

J. Martin, P. Hingant, L. Rew y P. Goyet

Las obras de ingeniería civil del túnel de Sinard en la autopista A51 al sur de Grenoble, tramo Coynelle/Puerto del Fau, se encuentran en fase de finalización en un entorno particularmente sensible. Las disposiciones adoptadas se derivan de cierto número de iteraciones que tienen por propósito optimizar el proyecto, integrando al mismo tiempo las evoluciones de las normativas relativas a la seguridad en los túneles viarios.

Le tunnel de la déviation dans le massif vosgien

Section type du tunnel
Typical cross section of the tunnel



OBJET DES TRAVAUX

La ville de Schirmeck comptabilise un trafic journalier de près de dix mille véhicules avec un grand nombre de poids lourds transportant notamment des grumes dont le gabarit pose de gros problèmes de croisement dans les virages en chicane. La communauté de cette paisible ville au pied des Vosges est très perturbée par ce flot incessant et croissant

Vue depuis l'intérieur du tunnel en phase excavation
View from inside the tunnel during the excavation phase



qui coupe la ville en deux, et rend ses accès piétons particulièrement dangereux.

Le tunnel de la déviation de Schirmeck redonnera à la ville toute sa tranquillité. Cet ouvrage situé sur les communes de Schirmeck, La Broque, Rothau et Barembach est constitué d'un tunnel monotube bidirectionnel déviant la RN 420 à l'ouest de la ville sous une butte boisée (sommet à 456 NGF) où se situe le château de Schirmeck.

Le projet global intègre les raccordements à la RN 420 de part et d'autre du tunnel, à l'extérieur de la ville. Ces raccordements ont nécessité différents aménagements, terrassements, murs de soutènement, murs antibruit, pont, qui ne sont pas développés dans cet article exclusivement consacré au tunnel.

PROJET PRÉVISIONNEL

Les grandes lignes

L'aménagement prévoit un tunnel routier tout trafic, bidirectionnel d'une longueur de 529 m et une section de 95 m² environ. Celle-ci permet d'accueillir deux voies de circulation pour une bande roulante de 9 m. Deux trottoirs de 0,85 m de part et d'autre de la chaussée sont aménagés, l'un recevant un caniveau à fente pour drainer les éventuels ruissellements, l'autre accueillant une multitubulaire noyée dans un massif de béton.

Le marché lancé en appel d'offre pour la première fois le 18 janvier 2002 par le ministère de l'Équipement du Logement, du Tourisme et de la Mer comprend, outre le creusement et le revêtement du tunnel, la réalisation des têtes nord et sud, le creusement de la galerie de secours, les chaussées ainsi que la bache à incendie.

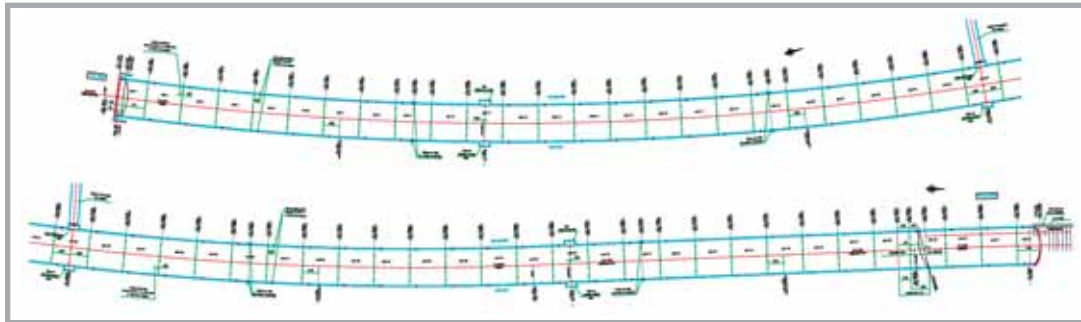
Le marché

Le marché est décomposé en une tranche ferme et trois tranches conditionnelles. La tranche ferme prévoit la réalisation du creusement du tunnel, son revêtement ainsi que la voirie définitive. Elle est assortie d'un délai de 18 mois.

La tranche conditionnelle 1 est assortie d'un délai de 12 mois pour la réalisation d'une galerie de secours de 150 m de long et de 7,5 m² de section, plus une bache d'alimentation du réseau incendie semi-enterrée en béton armé.

Les tranches conditionnelles 2 et 3 concernent respectivement la réalisation de la tête nord (6 mois)

de Schirmeck



Vue d'ensemble
General view

et de la tête sud (11 mois). Le marché précise qu'en cas de recouvrement des tranches dans le temps, le délai contractuel de l'ensemble ne sera pas réduit à moins de vingt mois.

La géologie

Le rapport de synthèse géologique, hydrologique et géotechnique du marché rédigé sur la base de campagnes successives menées entre 1990 et 2000 a conclu en la faisabilité du terrassement à l'explosif.

La géologie est, dans son ensemble, décrite comme étant constituée d'une roche dure siliceuse, abrasive pouvant ponctuellement être traversée par des zones broyées locales qui peuvent être altérées et/ou tectonisées. Ces roches sont des laves acides de l'ère primaire dénommées kératophyes. Initialement le mode opératoire du creusement était prévu à "l'explosif par demi-section". Une variante pleine section sera retenue par l'administration pour l'adjudication.

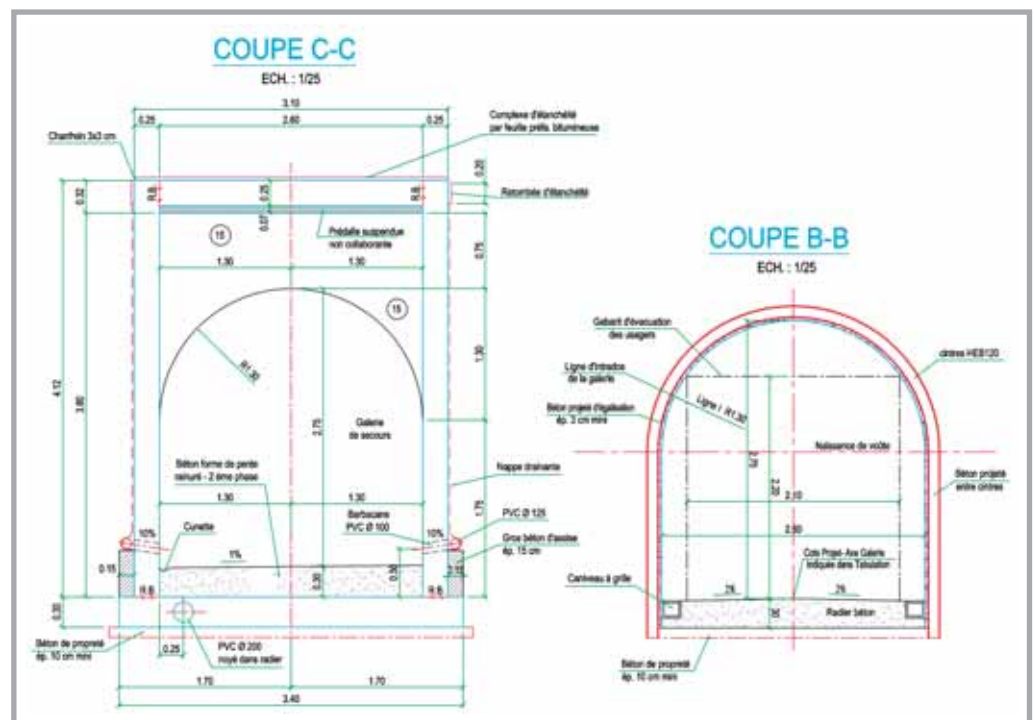
Informations géotechniques

La fracturation

Le rapport de synthèse note que les paramètres sismiques et les mesures sur les carottages convergent et montrent une diminution de la densité de fracturation à une profondeur de 20 à 25 m.

Les essais Lugeon quant à eux, "ne montrent pas de phénomènes de colmatage ou d'érosion des fissures qui traduiraient la présence d'un remplissage argileux d'épaisseur notable".

Les essais de cisaillement réalisés indiquent que les discontinuités sont "le plus souvent dilatantes". Enfin, dans les zones altérées, où l'on observe en général un remplissage argileux des discontinuités (argiles de décomposition), le rapport précise que "les conséquences pour l'ouvrage devraient rester faibles compte tenu des quantités limitées" ce qui est confirmé par les essais Lugeon qui, dans ces



zones, "ne montrent pas non plus de phénomènes de colmatage ou d'érosion de fissures".

Hydrogéologie

Une nappe en forme de dôme est identifiée à l'intérieur du massif. Les essais de perméabilité indiquent que la roche est peu perméable en profondeur ce qui confirme l'état fermé des discontinuités. Pour les travaux d'excavation ces éléments devraient se traduire par de "faibles venues d'eau pouvant ponctuellement atteindre quelques litres par minute lors d'événements pluvieux".

Dureté et abrasivité

"La roche à excaver est très dure et très abrasive".

Résistance et déformabilité

La résistance à la compression uniaxiale varie entre 32 et 165 MPa (moyenne 70 MPa) avec cependant

Section type galerie
de secours

Typical cross section
of the emergency gallery

Engins de marinage
Mucking machinery



Marinage des déblais
Excavation mucking removal



Tableau I
Table I

	Profil type de soutènement	Longueur prévisionnelle d'application (ml)	Application en %
Tunnel	P1A	179	34%
	P1B	150	28%
	P2	130	25%
	P2 "complète"	30	5,70%
	P3	2*20	7,30%
Total		529 ml	100%



des vitesses sismiques élevées 4000 à 6000 m/s. Ce paramètre ne se corrèle avec la dureté Cerchar que si l'on admet que la fissuration diminue les valeurs de résistance à la compression.

Le rapport précise la nature des roches à rencontrer suivant les classifications AFTES et Bieniawsky RMR (Rock Mass Rating). Cette répartition en fonction des classifications est également reportée sur le profil en long annexé à la synthèse géologique en mentionnant, pour chacun des linéaires distingués, les caractères dominants ou secondaires.

Le rapport distingue pour le projet deux unités géotechniques : la première, composée de roches frac-

turées peu altérées constitue l'essentiel des roches de l'intérieur du massif; la seconde, faite de roches fracturées et altérées est rencontrée aux entrées et sortie du tunnel et dans les zones tectonisées de l'intérieur du massif.

Enfin, le rapport indique que la rencontre d'aléas géologiques et géotechniques dont l'apparition sous forme de zones broyées n'est pas à exclure mais qu'elle devrait "rester d'extension limitée à quelques mètres".

Conclusion du rapport de synthèse géologique

Pour réaliser l'abattage, le rapport conclut sur la nécessité d'utiliser l'explosif en regard de la résistance élevée de la roche. Par ailleurs, il précise qu'en dehors de quelques zones ponctuelles de terrain broyé il n'y a pas de raison pour qu'apparaissent des hors profils géologiques.

Le rapport précise encore que les profils de soutènement boulons + béton projeté fibré et les profils type HEB + béton fibré alternent de façon répétitive sur le linéaire du tunnel et de la galerie avec des longueurs d'application pouvant être faibles. Le projet est élaboré en prenant en compte la répartition prévisionnelle des différents profils de soutènement indiqué dans le tableau I.

Cette analyse géologique et géotechnique aboutit à une répartition des profils de soutènement à partir de laquelle un quantitatif (DCE) est estimé.

Le marché décrit les dispositions particulières spécifiques à l'exécution du creusement du tunnel. Indépendamment des extrémités de tunnel il y a lieu de distinguer deux familles de profils principaux (cf. tableau II).

Le profil d'exécution type 3 est limité aux entrées nord et sud du tunnel, la voûte parapluie réalisée préalablement aux terrassements distingue ce profil des dispositions pour l'exécution du type 2.

Le creusement calculé sur ces répartitions de profils a une durée théorique de 9 mois.

Lors de l'établissement de son étude de prix, le groupement Razel et Demathieu & Bard a proposé, au vu des éléments géologiques et géotechniques du dossier de consultation des entreprises, une variante "pleine section" comme le règlement de consultation l'autorisait. Celle-ci a été retenue et notifiée par l'administration.

Le groupement d'entreprises Razel et Demathieu & Bard a été déclaré adjudicataire le 11 août 2003.

■ RÉALISATION DU CHANTIER

Lors de la réalisation du tunnel, la géologie rencontrée et le comportement du terrain excavé ont été très différents de ceux qui étaient attendus. Une adaptation permanente des profils de soutènement voire même des changements de méthodes de terrassement ont été nécessaires.

Le marché prévoyait un rocher dur réclamant partout l'emploi d'explosifs y compris dans les zones fracturées et altérées de faible extension, la découpe du terrain devant se faire sans hors profils, à l'exception des zones broyées. Aucune orientation préférentielle de la fracturation n'avait été identifiée.

En fait, altération et fracturation intenses avec pendage défavorable ont marqué l'excavation et sont les maîtres mots pour qualifier les terrains rencontrés :

- ◆ présence de très nombreux plans de fracturation entrecroisés de direction et pendages aléatoires, comblés par des matériaux argileux et dépôts ferrugineux d'épaisseurs variables rendant le massif instable ;
- ◆ nombreuses zones broyées générant également des éboulements et hors profils géologiques de volumes très conséquents ;
- ◆ découverte inattendue de spilites à partir du PM 222 ; cette roche particulièrement fracturée et altérée se trouve souvent sous forme de zébrures découpant le front en blocs éminemment instables, et même à partir du PM 287 sur la totalité de la section excavée ;
- ◆ nombreuses venues d'eau de débit pouvant atteindre 20 l/min, dont la circulation le long des plans de fracturation remplis d'argile favorise le glissement de blocs pour provoquer le détachement de gros volumes de roche ;
- ◆ accroissement notable des soutènements lourds ou renforcés. C'est ainsi que les soutènements avec cintres lourds (P2/P3) ont été mis en œuvre sur 416 m au lieu de 200 m prévus, et que le soutènement normal P1 retenu pour les roches peu altérées, programmé sur 179 m, n'a jamais pu être utilisé ;
- ◆ abattage à l'explosif rendu difficile par les effondrements de fronts et de parements, les instabilités de trous et même, dans certaines zones, un abattage au BRH, voire localement un abattage mixte (BRH et explosif).

Outre les nombreux éboulements recensés (plus de 50), des hors profils géologiques de volumes toujours importants, ont été constatés sur la quasi totalité de la longueur du tunnel. Généralement observés immédiatement après les tirs, et ce malgré les multiples aménagements apportés aux plans de tir, ils se sont fatalement amplifiés lors de la purge pour mise en sécurité du personnel, en raison de l'intensité de la fracturation et de l'altération du massif excavé. Ils se sont également produits lors de la foration ou encore quand l'excavation a été menée sans explosif avec le seul BRH.

De même, l'instabilité du massif a imposé le soutènement systématique du front par projection de béton, et boulonnage à partir du PM 226.

Ces bouleversements géologiques ont conduit à une modification sensible de la répartition des profils de soutènement ainsi qu'à un allongement des

	Profil type 1 (1A et 1B)	Profil type 2
Pleine section	> oui	> oui
Géologie	Roches peu altérées du cœur du massif	Roches plus altérées des zones de faible couverture et des zones tectonisées
Longueur de volée	4 m	1,4 m maximum
Soutènement	Boulons 4 m (4 à 8 A) (8 à 12 B) Béton projeté 15 cm moy. 8 cm min. Front de taille non systématique	Cintre HEB 180 1,0 m à 1,4 m d'espacement. Béton projeté fibré 29,5 cm moy. Projection sur front de taille, boulonnage du front de taille toute les deux volées
Mise en place soutènement par rapport à l'avancement	Soutènement à 100% Travée n-4	Immédiat voûte, piédroits, front de taille

Tableau II
Table II



Pelle et dumper de marinage
Shovel and mucking dumper

	Profil type de soutènement	Longueur réelle d'application (ml)	Application en %
Tunnel	P1A	0	
	P1B	113	21.4%
	P2	376	71%
	P3	40	8%
Total		529 ml	100%

Tableau III
Table III

délais de quatre mois et demi (tableau III). Le creusement a démarré le 5 janvier 2004 pour se terminer le 17 février 2005 au lieu du 14 septembre 2004 initialement prévu.

L'opération de bétonnage du tunnel s'est achevée le 23 juin 2005 suivant une cadence d'un plot par jour en section courante, conformément au programme prévisionnel.

CONCLUSION

La géologie du secteur du tunnel constituée de laves issues d'un volcanisme sous-marin de l'époque primaire, terrains parmi les plus anciens que l'on puisse trouver dans les Vosges, a livré, malgré les campagnes de reconnaissances successives, son lot d'imprévus.

L'altération des plans de fracturation plus importante que prévu a entraîné des instabilités locales



Préparation pour pose d'un cintre de soutènement
Preparation for placing a supporting arch

conséquentes qui ont recommandé la plus grande prudence dans la conduite des opérations afin de garantir la sécurité des intervenants en toutes circonstances.

De même que la maîtrise du profil excavé est le résultat de la très forte fracturation, les hors profils géologiques ont été importants et aggravés par le faible frottement des épontes des plans de fracturation et l'extrême altération des plans de fracture. Les nombreux plans de chargement testés n'ont pas permis d'améliorer le contrôle de la section excavée malgré un ratio au mètre cube excavé restreint de 0,9 kg/m³. Les remplissages des éboulements et hors profils géologiques ont nécessité la mise en œuvre de 11 000 m³ de béton projeté là où le marché prévoyait 3 600 m³.

La réduction de la longueur des volées 1,2 m moyen en profil P2 sur 416 m, l'absence de terrain de type P1, le terrassement au BRH des zones de spillite ont conduit à un allongement de la durée du creusement en proportion des soutènements mis en œuvre.

La collaboration rigoureuse et professionnelle des partenaires a permis de privilégier la sécurité et la qualité de l'ouvrage en toutes circonstances. Aucun accident grave n'est à déplorer malgré l'adversité des conditions. Les choix de purge, de soutènement immédiat à front ont permis de sécuriser les postes de travail dans les conditions les plus délicates.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maîtrise d'ouvrage

Etat. Ministère de l'Équipement, du Logement, du Tourisme et de la Mer - DDE du Bas-Rhin

Entreprises

Groupement d'entreprises Razel (mandataire), Demathieu et Bard

ABSTRACT

The Schirmeck bypass tunnel in the Vosges mountains

P. Ramond, P. Baraté

In order to lighten the heavy road traffic in the Schirmeck town centre, a bypass project, including in particular a 529-metre tunnel, is being carried out. The contract, put up for tender by the French Ministry for Equipment, Housing, Tourism and the Sea, includes not only tunnel driving and lining, but also execution of the north and south portals, digging of the emergency gallery, pavements and the firefighting tank. It was entrusted to the consortium formed by Razel (the leader) and Demathieu et Bard.

The tunnel, of cross section approximately 95 sq. m, ought to have been fully excavated by explosive out of the acid lavas of the primary era, called keratophyres.

The geology encountered and the behaviour of the ground excavated were very different from what was expected, and this required constant adaptation of the support profiles, or even changes of earthwork methods. The length of the tunnel excavation period accordingly increased from 9 to 14 months. Next, tunnel lining was performed in accordance with the forecast schedule, and is currently being completed by execution of the portals.

RESUMEN ESPAÑOL

El túnel de la variante de Schirmeck en el macizo de los Vosgos

P. Ramond y P. Baraté

Con el propósito de disminuir el importante tráfico vial del centro ciudad de la aglomeración urbana de Schirmeck, se realizó un proyecto de variante, que incluye, fundamentalmente, un túnel de 529 m. El contrato lanzado mediante licitaciones por el ministerio de Fomento, de vivienda, turismo y Mar incluye además la perforación y el revestimiento del túnel, la ejecución de las bocas Norte y Sur, la perforación de la galería de emergencia, los firmes así como la cubierta de contra incendio.

Este proyecto fue encargado a la agrupación de empresas Razel (mandatario), Demathieu y Bard.

El túnel, de una sección de aproximadamente 95 m², se hubiera debido excavar en su totalidad mediante explosivos en las lavas ácidas de la era primaria denominadas keratofires.

La geología en presencia y el comportamiento del terreno excavado fueron fuertemente distintos que aquellos que se habían anticipados, lo cual ha precisado una adaptación permanente de los perfiles de entibación e incluso de los cambios de métodos de movimientos de tierras. La duración de excavación del túnel ha pasado de este modo de 9 a 14 meses.

A continuación, el revestimiento del túnel se llevó a cabo, de conformidad con el programa previsto, para finalizarse actualmente por la realización de las bocas.

Le transfert des eaux de Salazie à la Réunion

Pour permettre un approvisionnement en eau nécessaire au développement du littoral Ouest de l'île de La Réunion, le Conseil général a décidé de réaliser le projet titanesque du basculement des eaux d'Est en Ouest, à partir des cirques de Mafate et de Salazie, en creusant 30 km de galerie.

Les deux articles qui suivent décrivent la dernière partie de ce projet : le transfert des eaux du cirque de Salazie. Il a exigé le creusement de deux galeries de 3,20 m de diamètre et d'une longueur totale égale à 18,1 km ainsi que les deux prises d'eau des rivières du Mât et des Fleurs Jaunes. Le caractère volcanique des terrains de l'île a créé des conditions géologiques particulièrement défavorables qui ont perturbé fortement le creusement des galeries.

L'importance de la pluviométrie du cirque de Salazie a imposé d'assurer une maîtrise des eaux pendant les travaux des deux prises d'eau dans des sites ayant de fortes contraintes dues à leur topographie.

■ CONTEXTE GÉNÉRAL

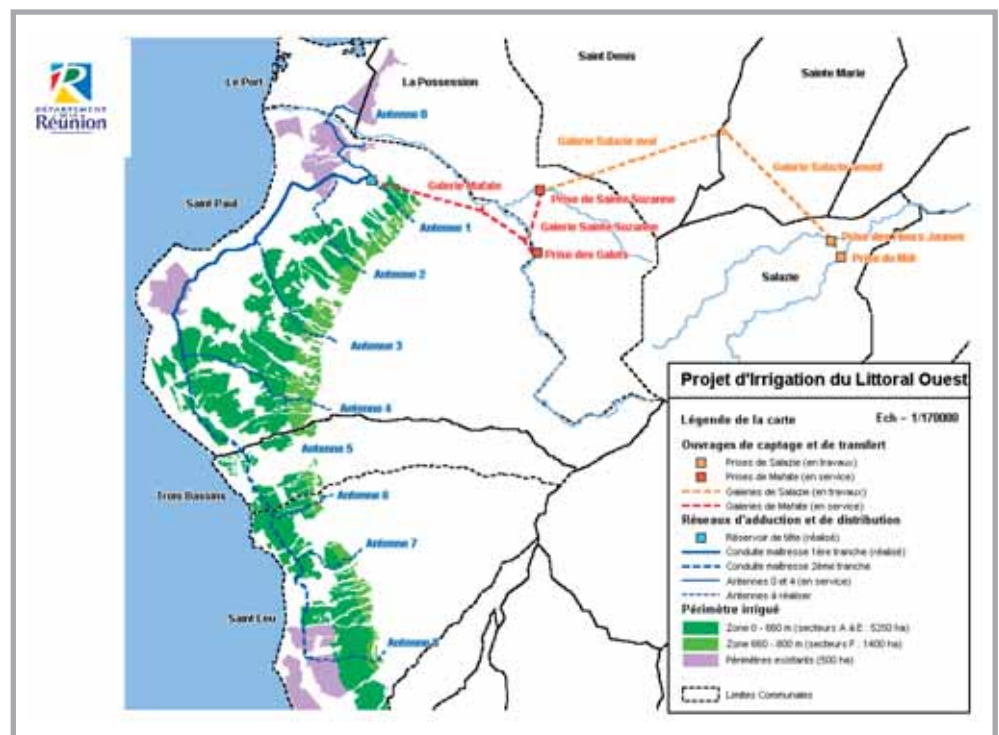
Détentrice de nombreux records mondiaux en matière de pluviométrie, l'île de la Réunion dispose de ressources abondantes cependant mal réparties entre les côtes ouest (sous le vent) et est (au vent).

Dans le but de résoudre le déficit chronique en eau de la côte ouest de la Réunion, le Conseil général entreprend en 1983, dans le cadre de la mise en place d'une gestion globale de l'eau, le projet d'irrigation du littoral ouest avec pour objectifs :

- ◆ d'irriguer les surfaces agricoles de la côte ouest de l'île (7 150 ha, 3 000 exploitations agricoles) ;
- ◆ de renforcer la desserte en eau des communes pour les besoins domestiques et industriels (cinq communes abritant 180 000 habitants soit la moitié de la population réunionnaise) ;
- ◆ de réalimenter la nappe phréatique de la rivière des Galets.

Le projet devrait permettre une augmentation de la production de canne à sucre de 300 000 t par an, soit 50 000 t de sucre. La production actuelle, de l'ordre de 200 000 t de sucre par an, est en effet inférieure au quota sucrier de la Réunion, fixé à 296 000 t.

Le confortement de la filière canne – sucre – bagasse – électricité participera à la préservation de 15 000 emplois et des deux usines sucrières en activité. Par ailleurs, le projet permettra une diversification rentable en maraîchage et arboriculture (20 %) et en fourrage (5 %) (figure 1).



■ LA SOLUTION RETENUE

Choisi au terme d'une analyse comparative menée sur les volets techniques, économiques et environnementaux des différentes variantes envisageables pour la desserte en eau de la région Ouest, le projet consiste en un transfert par 30 km de galeries souterraines des eaux captées dans les cirques de Salazie et de Mafate vers une conduite principale alimentant les différentes antennes d'irrigation.

Le volet "transfert" du projet se décompose en plusieurs phases techniques :

- ◆ le transfert de Mafate, dont les travaux ont été

Figure 1
Projet d'irrigation du littoral ouest
West coastline irrigation project

Photo 1
Phase Mafate : réservoir
de Mon Repos

Mafate phase :
Mon Repos reservoir



Photo 2
Prise d'eau
de la rivière
des Galets
Water intake
in the Les Galets river



compagnées de deux ouvrages de régulation et de sécurité,

- un réservoir de tête situé à Mon Repos (Bois de Nêfles - Saint Paul), d'une capacité de 2 x 25 000 m³ (interface entre les ouvrages de transfert et les réseaux d'adduction), équipé d'une station de filtration (300 microns);

- ◆ le transfert de Salazie, dont les travaux sont en cours :

- deux prises d'eau dans le cirque de Salazie, l'une sur la rivière du Mât et l'autre sur la rivière des Fleurs Jaunes (débit d'équipement : 4,40 m³/s), avec équipements hydromécaniques et électriques,
- deux galeries souterraines entre le cirque de Salazie et le Bras de Sainte-Suzanne dans Mafate, d'une longueur totale de 18 km (photos 1 et 2).

LE TRANSFERT DE SALAZIE

Les intervenants

La maîtrise d'ouvrage du projet est assurée par la Direction de l'Eau du Département de la Réunion, laquelle bénéficie d'une assistance apportée par la Direction de l'Agriculture et de la Forêt dans le cadre d'une mission de conduite d'opération.

Le groupement composé de la Compagnie nationale d'aménagement du Bas Rhône Languedoc (BRL), de la Société du Canal de Provence et du bureau d'études SECMO a la charge de la maîtrise d'œuvre du transfert.

Le Département de la Réunion s'est par ailleurs associé les services de Biotope Sarl dont le rôle est d'assister le maître d'ouvrage en matière de prise en compte de l'environnement (insertion paysagère des ouvrages, minimisation de l'impact des ouvrages en phases travaux et d'exploitation).

La coordination en matière de sécurité et de protection de la santé est assurée par Socotec pour les galeries et OTH océan Indien pour les prises.

Le coût du projet

Le montant du projet de transfert de Salazie est évalué à 365 millions d'euros à l'horizon 2010, date prévisionnelle de sa mise en service. Le département de la Réunion bénéficie d'un soutien financier de l'Europe et de l'Etat respectivement à hauteur de 55 et 10 %.

Les galeries de Salazie

Description générale et mode de creusement

Les principales données relatives aux galeries de Salazie sont indiquées dans le tableau I.

Les deux galeries de Salazie (aval et amont) sont creusées par deux tunneliers différents de caractéristiques identiques. Les tunneliers, de marque

réalisés entre 1989 et 1995 et comprennent :

- deux prises d'eau dans le cirque de Mafate, l'une sur la Rivière des Galets et l'autre dans le Bras de Sainte-Suzanne (débit d'équipement : 1,95 m³/s),
- deux galeries souterraines d'une longueur totale de 12 km, d'un diamètre intérieur de 3,75 m ac-

Tableau I
Principales données
des galeries de Salazie

Key data concerning
the Salazie galleries

	Galerie aval	Galerie amont
Caractéristiques principales		
longueur	9 700 m	8 400 m
diamètre intérieur	3,20 m	3,20 m
revêtement	Anneaux préfabriqués en béton de 20 cm d'épaisseur et de 1,25 m de longueur, composés de 5 voussoirs (poids d'un anneau : 8050 kg)	Anneaux préfabriqués en béton de 20 cm d'épaisseur et de 1,25 m de longueur, composés de 5 voussoirs (poids d'un anneau : 8050 kg)
couverture de terrain	Jusqu'à 1300 m	Jusqu'à 1500 m
Principales quantités		
terrassements extérieurs	165 000 m ³	95 000 m ³
terrassements en souterrain		
à l'explosif	15 000 m ³	7 500 m ³
au tunnelier	120 000 m ³	100 000 m ³
voussoirs pour revêtement	7 500 anneaux	6 400 anneaux
linéaire excavé à l'explosif	300 m	770 m
linéaire excavé à l'explosif	300 m	770 m

Herrenknecht (fabriqués en Allemagne), sont de type à "double bouclier télescopique" et permettent la pose à l'avancement des voussoirs (anneaux de revêtement en béton) et l'injection du mortier de bourrage entre le revêtement et le terrain. La cadence théorique de creusement est de 30 m par jour, sur trois postes de travail.

Chaque tunnelier est composé d'un bouclier et d'un train suiveur. Le bouclier est la partie active du tunnelier, où sont implantés les équipements d'excavation et de pose des voussoirs. Il est constitué de cinq éléments, d'un poids total avoisinant les 200 t :

- ◆ le disque de coupe :
 - diamètre : 3,865 m,
 - puissance de la tête : 1 000 kW,
 - couple nominal : 1 500 kNm,
 - dispositif de coupe composé de 26 molettes (14 simples + 6 doubles) ;
- ◆ le corps avant comprenant les moteurs d'entraînement et les stabilisateurs ;
- ◆ le corps du milieu ou corps télescopique, intégrant les dispositifs de poussée principale et d'articulation de la machine :
 - poussée principale par huit vérins - poussée totale de 1 200 t,
 - articulation par sept vérins d'une poussée unitaire de 10 t ;
- ◆ le corps grippeurs : avancement du tunnelier par appui latéral des grippeurs sur le terrain extérieur,
 - quatre vérins assurant une poussée totale de 2 700 t,
 - dispositif de poussée secondaire en appui sur les anneaux de revêtement posés, par 11 vérins d'une poussée totale de 1 100 t,
 - dispositif d'érection des voussoirs ;
- ◆ la jupe arrière : zone dans laquelle sont posés les voussoirs, à l'abri du terrain excavé.

A l'arrière du bouclier, un train suiveur (ou *back up*) de 280 m de longueur intègre :

- ◆ les installations électriques et hydrauliques pour le fonctionnement du tunnelier (pompes hydrauliques, transformateurs électriques,...) ;
- ◆ la cabine de pilotage de la machine ;
- ◆ le dispositif de retournement des voussoirs ;
- ◆ le système de ventilation de la galerie ;
- ◆ le convoyeur pour l'évacuation du marinage (déblais de creusement) ;
- ◆ les rails pour cheminement des convois de service (longueur 98 m) comprenant un locotracteur + batterie, les wagons pour le personnel, un wagon à mortier, des wagons de voussoirs, des wagons à déblais ;
- ◆ les locaux pour le personnel (coin repas...).

Des chantiers soumis aux aléas

Le creusement des galeries de Salazie a été confronté à ce jour à de nombreuses difficultés qui ont généré des retards conséquents dans le calendrier prévisionnel de réalisation des ouvrages.



Photo 3
Galerie Salazie aval :
plate-forme
Sainte-Suzanne
*Downstream Salazie
gallery : Sainte-Suzanne
platform*

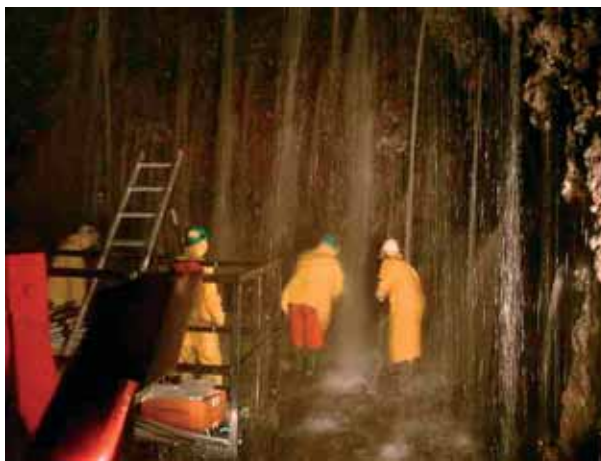


Photo 4
Galerie Salazie aval :
préparation tir explosif
sous l'eau
*Downstream Salazie
gallery : preparation
for an explosive blast
under water*

■ LA GALERIE SALAZIE AVAL (photos 3, 4 et 5)

A l'issue des travaux préparatoires (aménagement d'une piste de chantier dans le lit de la Rivière des Galets et de la plate-forme, construction de l'usine de préfabrication des voussoirs), le creusement de la galerie aval a été engagé avec l'excavation à l'explosif de la fenêtre d'attaque sur un linéaire de plus de 400 m. Le tunnelier a alors pu être monté dans l'ouvrage de sécurité et mis en service.

Il est entré en action le 26 juillet 1999 et sa progression a par la suite été stoppée à deux reprises, à la rencontre de deux discontinuités géologiques, la première le 13 juillet 2000 au point métrique (PM) 3171 et la deuxième le 14 août 2001 au PM 5175. Ces blocages de la machine, provoqués par des effondrements de terrain, ont immobilisé le tunnelier pendant respectivement 7 et 2 mois.

Il est également à noter qu'en début d'année 2002, les travaux ont été fortement perturbés par le passage du cyclone Dina, le 21 janvier, qui a détruit la piste d'accès au chantier. La reconstruction de cette piste, entamée dès la décrue, n'a pas permis un redémarrage du creusement dans la mesure où un deuxième cyclone, Hary, a à nouveau détruit la piste en date du 10 mars 2002. Le creusement n'a donc repris que le 19 avril 2002.

En juin 2002, afin de s'affranchir des difficultés



Photo 5
Galerie Salazie aval : galerie revêtue
Downstream Salazie gallery : lined gallery

► géologiques attendues au droit de l'extrémité amont, a démarré le creusement du tronçon terminal de la galerie aval en attaque descendante, depuis le chantier de la rivière des Pluies. Malgré des conditions géologiques défavorables (rencontre de zones de terrains instables, venues d'eau importantes), l'excavation a progressé pour atteindre les 600 m projetés en juin 2003.

En parallèle, le tunnelier avait atteint en décembre 2002 le point métrique 8725 où une venue d'eau importante a conduit à décider son arrêt définitif au profit d'un achèvement de l'excavation à l'explosif en prolongement de l'attaque amont.

Le franchissement de cette zone au tunnelier aurait en effet nécessité des opérations préalables de traitement de terrain par injections ou de drainage, lesquelles auraient été complexes et de surcroît très coûteuses. Il a donc été décidé de poursuivre la réalisation de la galerie sur les 514 m restants à l'explosif depuis le front d'attaque amont. La rencontre des deux fronts d'attaque a été effectuée le 4 décembre 2003. Ont dès lors été engagés les travaux de revêtement et de confortement dont l'achèvement est attendu pour la mi-2005.

■ LA GALERIE SALAZIE AMONT

(photos 6, 7, 8 et 9)

Une première phase de travaux a eu pour objectif de creuser à l'explosif une fenêtre d'attaque de 430 m de longueur à partir de la plate-forme aménagée en bordure du lit de la rivière des Pluies.

La rencontre de plusieurs zones de venues d'eau lors de l'excavation de cette fenêtre avait conduit le maître d'œuvre, en septembre 2000, à décider la poursuite du creusement à l'explosif et retarder en conséquence la mise en service du tunnelier, initialement prévue à l'extrémité de l'ouvrage de sécurité (point métrique 500). Le risque de rencontre d'une zone aquifère pouvant générer des venues d'eau de plusieurs centaines de litres par seconde justifiait en effet la poursuite du creusement à l'explosif.

La rencontre de terrains secs a conduit le maître d'œuvre à demander à l'entreprise la mise en service du tunnelier qui a commencé sa progression vers Salazie le 2 août 2001 au point métrique (PM) 773. Le creusement au tunnelier s'est déroulé normalement pendant environ deux mois et sans venue d'eau notable.

Le 2 octobre 2001, au point métrique 1221, des arrivées d'eau ont commencé à se manifester. Celles-ci ont augmenté rapidement alors que la progression du tunnelier s'avérait de plus en plus difficile. Le débit des venues d'eau avait alors pratiquement atteint 200 l/s le 9 octobre 2001 puis 400 l/s environ lorsque la progression du tunnelier a finalement été arrêtée au PM 1238.

Alors que les autres venues d'eau précédemment rencontrées dans la galerie (PM 200/220, PM 290, PM 380/440 et PM 530/620) avaient montré un tarissement rapide, ce qui mettait en évidence que les aquifères alimentant ces arrivées d'eau devaient être de taille limitée, les débits mesurés au PM 1238, ne montraient pas de baisse significative au cours des mois suivant l'arrivée de la venue d'eau. Quelques sondages ont alors été réalisés au travers du tunnelier qui ont confirmé la présence d'eau sous pression jusqu'à 18 bars dans le terrain, à l'avant du point d'arrêt du tunnelier.

La saison cyclonique 2001-2002 ayant été de surcroît particulièrement défavorable (Dina, mouvement de terrain sur le site du Grand Eboulis, en amont de la plate-forme d'attaque, ayant entraîné une interdiction d'accès au lit de la rivière), le chantier est demeuré inaccessible jusqu'à fin mai 2002 en raison des multiples ruptures de la piste.

La rencontre de la venue d'eau du PM 1238 par le tunnelier a rendu nécessaire entre 2002 et 2004 l'engagement de nouvelles investigations, analyses et études afin de repositionner l'avancement du projet en termes technique et financier. C'est dans ce contexte que le Département a notamment fait appel au Conseil général des Ponts et Chaussées pour une mission d'expertise à caractère technique et financier sur la gestion de cet incident. Sur la base des reconnaissances complémentaires de terrain et des analyses menées par les différents intervenants du projet, un certain nombre de dispositions ont été prises, à savoir :

- ◆ mise en œuvre d'une galerie de contournement parallèle à la galerie principale entre le PM 1238 et la rivière des Pluies qui servira d'exhaure pour évacuer des débits estimés à 2 m³/s. La réalisation de cette galerie s'est achevée en août 2004 ;
- ◆ lancement d'une campagne de reconnaissances complémentaires : prospections à front à partir du PM 1238, sondage à l'extrémité amont de la galerie ;

- ◆ reprise, à compter du 15 septembre 2004, du creusement à l'explosif de la galerie jusqu'au PM 1420 (terminé en décembre 2004).

Au-delà de ces actions déjà engagées, la recherche de la solution globale et optimale pour la finalisation du chantier a été priorisée. L'expertise conduite par le Conseil général des Ponts et Chaussées et les analyses menées par le maître d'œuvre et le conducteur d'opération depuis 2003 ont permis de dégager les orientations stratégiques à mettre en œuvre pour la poursuite du creusement de la galerie Salazie amont.

Au terme des différentes réflexions, la solution "tunnelier existant et explosif, en cas de nécessité, complétée de toutes les dispositions pouvant améliorer l'avancement de la réalisation de cette galerie" est apparue optimale en termes de modalités techniques d'exécution, de coûts de travaux et de délais de réalisation.



Photo 6
Galerie Salazie amont :
plate-forme rivière
des Pluies

*Upstream Salazie
gallery : Pluies river
platform*



Photo 7
Galerie Salazie amont : tunnelier

*Upstream Salazie gallery : tunnel boring
machine*

Autour de cette ligne directrice, s'articulent un certain nombre de dispositions qui permettront d'améliorer l'efficacité de cette solution, et en particulier :

- ◆ l'anticipation et l'identification des risques d'immobilisation du chantier à partir du point métrique 3 300 de la galerie amont (sondages de reconnaissance à l'avancement) ;
- ◆ l'examen précis de la nécessité et de la meilleure méthode à retenir pour un creusement concomitant à partir de l'extrémité amont de la galerie ;
- ◆ l'étude de toutes les améliorations de la solution retenue, dont la mise en œuvre n'augmenterait ni les délais de réalisation, ni les coûts.

L'application de ces orientations permet d'envisager une finalisation de la galerie à l'horizon 2010.

Bibliographie

Tunnels et ouvrages souterrains - N° 182, mars-avril 2004, pages 71 à 74. Thierry Borca, Nicolas Mergloff. Basculement des eaux de la Réunion. Un chantier titanesque.



Photo 8
Galerie Salazie
amont : entrée
du tunnelier

*Upstream Salazie
gallery : TBM
entrance*



Photo 9
Galerie Salazie amont :
fenêtre d'attaque
des Pluies

*Upstream Salazie gallery :
Pluies river attack
window*

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Galerie Salazie aval

Groupement Spie Batignolles TPCI (mandataire), Sotrabas, Razel Frères, Pico OI et Bilfinger & Berger

Galerie Salazie amont

Groupement Bouygues TP (mandataire), DTP Terrassement, Spie Batignolles TPCI, Sotrabas, Razel Frères, Pico OI et Bilfinger & Berger

Prises d'eau de Salazie

- Lot génie civil : demathieu et bard
- Lot équipement des prises et des galeries : groupement Perrier Sorem, SETB, CIEL

Île de la Réunion

Prises d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS POUR LE GÉNIE CIVIL DES PRISES D'EAU

Maîtrise d'ouvrage

- Département de la Réunion
- Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
Direction de l'Agriculture et de la Forêt

Maîtrise d'œuvre

- BRL
- S.C.P.
- S.E.C.M.O.

Entreprise

demathieu & bard

Sous-traitant

G.T.O.I.

Minage

STIPS

Montant du marché : 173 millions de francs HT en 2001

■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE

L'île de la Réunion constitue la manifestation la plus méridionale de la crête des Mascareignes dans une zone de volcanisme de point chaud. L'île est constituée de deux ensembles volcaniques principaux :

- ◆ le piton des Neiges, le plus ancien (de l'ordre de 2 millions d'années), culminant à 3 070,5 m ;
- ◆ le piton de la Fournaise, plus récent (250 000 ans environ) et actif, culminant à 2 631 m.

Les effondrements des contreforts du piton des Neiges ont créé trois cirques :

- ◆ le cirque de Cilaos au Sud-Ouest ;
- ◆ le cirque de Mafate au Nord-Ouest ;
- ◆ le cirque de Salazie à l'Est.

La Réunion est une île située dans la zone intertropicale humide ayant plus de 40 % de sa superficie au-dessus de 1 000 m d'altitude. Ces caractéristiques engendrent de forts contrastes de température et de pluviométrie entre la côte ouest et la côte est.

L'île se divise en trois grandes zones climatiques :

- ◆ la côte ouest "sous le vent", sèche et chaude,
- ◆ la côte est "au vent", soumise aux alizés de la mer chargés d'humidité, avec des vents et des pluies abondantes ;

◆ les hauts de l'île avec les hautes plaines situées entre les deux zones montagneuses où il y a des températures plus fraîches et un ensoleillement plus limité.

L'île de la Réunion détient des records de précipitations. Les pluies cycloniques et la topographie de l'île font qu'il tombe jusqu'à 12 m d'eau par an sur le piton de la Fournaise, dans la partie Est de l'île, et que toute la partie Ouest de l'île souffre d'un manque d'eau et doit faire face à des périodes de sécheresse.

Cette inégale répartition de la pluviométrie pose problème tant pour l'alimentation en eau potable que pour l'agriculture.

Pour l'alimentation en eau des côtes Ouest et Sud, les études ont montré qu'il était nécessaire de prévoir un basculement de l'eau disponible d'Est en Ouest.

Pour irriguer le littoral Ouest, une première phase de construction de ce transfert des eaux de la rivière des Galets et du Bras de Sainte-Suzanne situées dans le cirque de Mafate a été réalisée.

Une seconde phase est en cours d'exécution pour amener sur la côte ouest les eaux captées dans la rivière du Mât et dans la rivière des Fleurs Jaunes se trouvant dans le cirque de Salazie.

Les débits d'équipement pour le cirque de Salazie sont de :

- ◆ prise d'eau de la rivière du Mât : 2,45 m³/s ;
- ◆ prise d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes : 1,95 m³/s.

Débit réservé :

- ◆ rivière du Mât : 0,43 m³/s ;
- ◆ rivière des Fleurs Jaunes : 0,32 m³/s.

Les débits réservés seront majorés, en application de l'article L232-5 du Code rural pendant des périodes fixées chaque année par arrêté préfectoral, dont la durée cumulée ne pourra pas excéder 20 jours par an. Les valeurs des débits réservés majorés sont :

- ◆ Mât : 2,145 m³/s ;
- ◆ Fleurs Jaunes : 1,610 m³/s.

Dans le cadre de cette seconde phase de travaux, demathieu & bard a été chargé de réaliser le génie civil des ouvrages des prises d'eau de ces deux rivières. Ce marché de travaux comprend deux tranches :

- ◆ la tranche ferme pour l'ensemble des ouvrages de la rivière du Mât ;
- ◆ la tranche conditionnelle comprenant l'ensemble des ouvrages de la rivière des Fleurs Jaunes.

La saison cyclonique prévisible va du mois de décembre au mois d'avril. Le marché négocié tient

Rivière du Mât : ensemble de la prise d'eau
Mât river : water intake system



PRINCIPALES DATES DE RÉALISATION

Prise d'eau de la rivière du Mât

- Début des travaux : 21 octobre 2001
- Fin des travaux : 11 décembre 2002

Prise d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes

- Début des travaux : 14 juin 2004
- Fin des travaux : février 2006

du Mât et de la rivière

compte des sujétions dues aux cyclones pendant cette période, en particulier, de la mise en sécurité du chantier et des ouvrages et de la reprise des travaux.

En dehors de la saison cyclonique, les délais d'exécution peuvent être prolongés d'un nombre de jours égal à celui pendant lequel au moins un des phénomènes naturels suivants dépasse ou atteint les valeurs limites définies ci-dessous à la station météorologique de Mare à Vieille Place :

- ◆ vent : rafales mesurées à plus de 100 km/h ;
- ◆ pluie : 200 mm cumulés sur une journée ;
- ◆ cyclone : alerte orange et rouge.

■ SITES

Rivière du Mât

Le site de la rivière du Mât se situe au lieu-dit La Cayenne, à environ 1 km en aval du village de Salazie. Il se caractérise par une gorge profonde d'une vingtaine de mètres, dans laquelle est situé le seuil de la prise d'eau, et de part et d'autre de celle-ci, d'un plateau de 150 m à 200 m de largeur.

Le site est accessible :

- ◆ en rive droite, par une piste donnant accès à un dépôt de matériel du Service des routes du département ;
- ◆ en rive gauche, par un chemin privé desservant des habitations riveraines et situé sur la route de Bois de Pomme.

Des superficies disponibles pour les installations de chantier n'existent que sur la rive droite, au lieu-dit La Cayenne. Il n'y a pas de terrain disponible en rive gauche à cause de la proximité des habitations.

Les installations de chantier sont accessibles par le CD 48 sans avoir à traverser le village de Salazie.

Pour accéder à la berge rive droite depuis le RD 48, une piste en enrobé de 800 m qui a nécessité 20 000 m³ de déblais et 8 000 m³ de remblais a été réalisée.

Dans un premier temps, conformément au projet, la traversée de la rivière du Mât s'effectuait par l'intermédiaire d'un passage busé (Ø 1 200 x 3) submersible appelé "radier" à la Réunion. A peine réalisé en janvier 2002, les crues consécutives aux cyclones Dina et Harry ont fortement endommagé ce radier, accès unique au chantier. L'attente de la décrue et le temps nécessaire au rétablissement du passage pénalisaient l'avancement des travaux.

Sur proposition de demathieu & bard, il a donc été décidé de s'affranchir de ces aléas en remplaçant le radier par un "pont-levant".

Cet ensemble est constitué d'un pont "Bailey" de 30 m de portée et de 26 t de capacité et de deux "culées-portiques". Celles-ci sont surmontées chacune d'un portique de 6 m de hauteur équipé de deux vérins creux de 50 t permettant, lors des alertes de fortes pluies ou de cyclone de remonter le pont d'une hauteur de 5 m, soit plus de 10 m au-dessus du lit de la rivière, niveau correspondant à une crue centennale. Le pont en position basse est à 5 m au-dessus du lit de la rivière et permet ainsi un accès permanent au chantier, même en cas de crues (usuelles), nous affranchissant ainsi de la période cyclonique allant du 15 décembre au 15 avril.



Rivière des Fleurs Jaunes

Le site se trouve au lieu-dit Bois de Pomme, au droit de la passerelle assurant l'accès à l'îlet des Fleurs Jaunes. Il se caractérise par une gorge profonde d'une trentaine de mètres au droit de l'ouvrage, et de part et d'autre des plateaux :

- ◆ en rive gauche, d'une largeur de 25 m environ avec une pente de 38° par rapport à l'horizontal ;
- ◆ en rive droite, de terrasses successives formant une largeur totale variant de 20 m à 50 m.

Les surfaces disponibles pour les installations de chantier sont réduites et doivent être aménagées sur la zone en terrasse.

Iliès Amami



DIRECTEUR GRANDS
PROJETS OCÉAN INDIEN
demathieu & bard

Christian Batoux

INGÉNIEUR MÉTHODES ET TRAVAUX
demathieu & bard

Jacques Mossot



DIRECTEUR
SCIENTIFIQUE
demathieu & bard

Pont levant
sur la rivière du Mât

Lift bridge
on the Mât river

Prise de la rivière des Fleurs Jaune. Piste
*Water intake in the Fleurs Jaunes river.
 Track*



appuis. Moyennant quelques aménagements, il a donc été décidé que la passerelle provisoire devienne définitive.

■ OUVRAGES

Les ouvrages qui composent les prises d'eau de la rivière du Mât et de la rivière des Fleurs Jaunes, sont, dans le sens de l'écoulement hydraulique :

- ◆ la passe à bichiques, avec son radier incliné à 50° par rapport à l'horizontale, permettant de rattraper le dénivelé de 12 m pour que le "caviar de la Réunion" puisse remonter le cours de la rivière ;
- ◆ le seuil en rivière, divisé en trois plots, avec une fosse de prise équipée d'une grille limitant le passage des gravats à 50 mm ;
- ◆ le chenal d'amenée ;
- ◆ le dégraveur-dessableur, entre le chenal d'amenée et le chenal de chasse ;
- ◆ le local technique, au-dessus du dégraveur-dessableur ;
- ◆ le chenal de chasse ;
- ◆ le puits de chute assurant la liaison avec la galerie amont de Salazie.



Le site n'est accessible, avant les travaux, que par un sentier depuis la route de Bois de Pomme.

Pour accéder à l'entrée de la future piste d'accès, l'entreprise a dû construire une piste de contournement de 300 m afin d'éviter la traversée d'un lotissement générant 45000 m³ en déblais et 7800 m³ en remblais.

La forte pente de la piste d'accès au site (pente constante de 15 %), de 550 m de longueur, a conduit à la réaliser en béton rainuré.

Les ouvrages se trouvant à l'emplacement d'une passerelle desservant le plateau rive gauche, celle-ci a été remplacée par une passerelle provisoire rigide en acier galvanisé. La construction d'une passerelle définitive prévue initialement en aval a été remise en cause du fait de la présence d'orchidées protégées en rive gauche, au droit de ses

■ MAÎTRISE DES EAUX

L'importance des précipitations pluviales et les variations des niveaux des rivières que cela entraîne imposent que le phasage des travaux tiennent compte de ces contraintes.

La première de ces contraintes est due à la période cyclonique, entre le 15 décembre et le 15



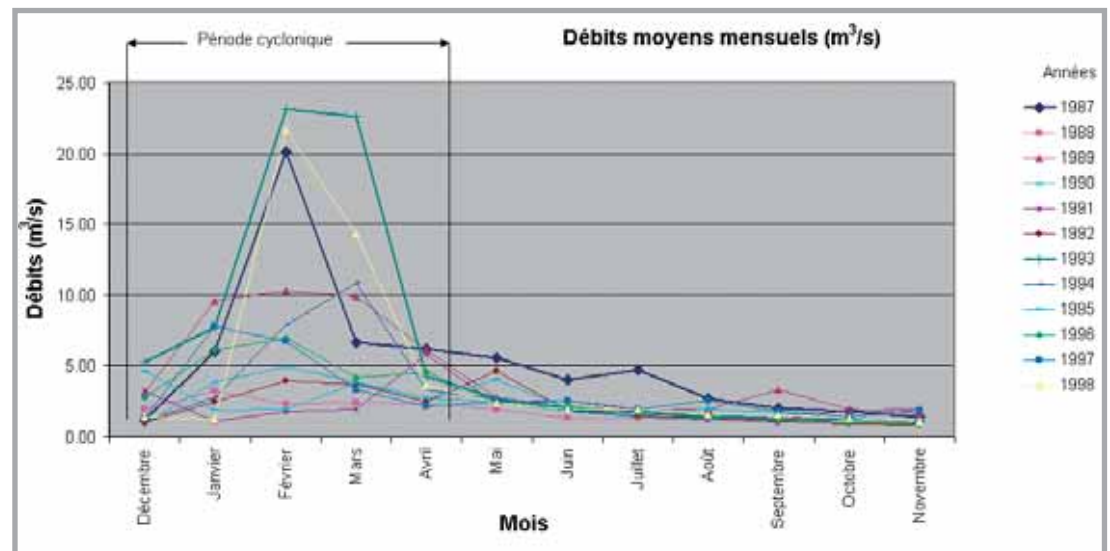
Prise d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes. Réalisation de la passe à bichiques
*Water intake in the Fleurs Jaunes river.
 Construction of the "bichique" fish ladder*

Tableau I
 Débits de pointe relevés à la station hydrométrique du pont de l'Escalier
Peak flows recorded at the Escalier Bridge stream gauging station

Année	1987	1989	1993	1995
Cyclone	Clotilda	Firinga	Cécilia	Kelvina
Crue (m ³ /s)	800	450	350	320

Débits moyens mensuels à la rivière du Mât déduits des relevés faits à la station hydrométrique située à 40 m du pont de l'Escalier

Mean monthly flows in the Mât river deduced from the recordings taken in the stream gauging station located 40 metres away from the Escalier Bridge



avril, pouvant interdire tout passage des rivières et l'usage des grues pour l'amenée des matériels et matériaux.

Les débits de pointe relevés à la station hydrométrique du pont de l'Escalier située en aval du chantier pendant des cyclones sont notés sur le tableau I. Une nouvelle étude hydrologique a conduit à un débit de pointe en crue centennale égal à :

- ◆ pour la rivière du Mât : 2 450 m³/s ;
- ◆ pour la rivière des Fleurs Jaunes : 2 200 m³/s.

En février 1998 il a été observé des précipitations de 1 362 mm en 24 heures à Salazie Village et 422 mm en 3 heures à Mare à Vieille Place.

Le cahier des clauses administratives particulières stipule que l'entreprise doit mettre en place "tous les ouvrages provisoires et prendre toutes les mesures nécessaires pour protéger son chantier contre la venue des eaux normales et exceptionnelles à concurrence de la crue d'occurrence quinquennale hors période cyclonique".

Les valeurs contractuelles sont :

- ◆ pour la rivière du Mât : 65 m³/s ;
- ◆ pour la rivière des Fleurs Jaunes : 50 m³/s.

Ces débits sont déduits des mesures faites à la station du pont de l'Escalier en adoptant la répartition suivante :

$$Q_{\text{Mât}} = 0,519 \times Q_{\text{Escalier}}$$

$$Q_{\text{Fleurs Jaunes}} = 0,373 \times Q_{\text{Escalier}}$$

Les travaux sont réalisés en 3 phases, soit, dans le cas de la prise d'eau de la rivière du Mât :

◆ **phase 1 :**

- réalisation de la voie d'accès au lit de la rivière,
- préterrassement du plot 1 du seuil et de la passe à bichiques,
- réalisation d'un merlon de protection en rive droite,
- minage de la berge rive droite pour la réalisation de l'ancrage dans la falaise du plot 3 du seuil,
- minage des plots 2 et 3 sans évacuation des matériaux pour respecter la distance minimale à une structure existante de 10 m ;

◆ **phase 2 :**

- démolition du merlon de protection,
- déviation du cours de la rivière en rive droite
- réalisation d'une pré fouille et mise en fiche d'un rideau de palplanches permettant la protection des travaux en berge rive gauche,
- pose des liernes et butonnage du rideau de palplanches,
- mise en œuvre d'un enrochement percolé protégeant le rideau de palplanches,
- réalisation du plot 1 du seuil, de la passe à bichiques et du chenal d'amenée ;

◆ **phase 3 :**

- dépose du rideau de palplanches de la phase 2,
- canalisation de la rivière vers un sas provisoire aménagé dans le mur de la passe à bichiques,
- réalisation d'une pré fouille et mise en fiche d'un rideau de palplanches protégeant les plots 2 et 3 du seuil,



Prise d'eau de la rivière du Mât. Ensemble
Water intake in the Mât river. Overall view

- mise en place d'un enrochement percolé de protection du rideau de palplanches,
- réalisation des plots 2 et 3 du seuil,
- réalisation du chenal de chasse y compris la galerie.

Ce mode opératoire entraîne la réduction de la section mouillée pendant la phase de travaux.

Nous avons donc été amené à vérifier les débits capables laissés par ces réductions de section mouillée pendant les phases de travaux 2 et 3.

En phase 2 pour la rivière du Mât, le débit capable de la rivière avec la section réduite du batardeau et en tenant compte d'un élargissement local peut être calculé à partir de la formule de Manning-Strickler (Recommandation "Assainissement routier" - LCPC-Setra) :

◆ débit Q_c en :

$$Q_c = V.S$$

◆ vitesse V en m/s :

$$V = K.RH^{\frac{2}{3}}.p^{\frac{1}{2}}$$

où :

- K = coefficient de rugosité de Manning-Strickler



Réalisation du plot de la prise d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes
Construction of the water intake block in the Fleurs Jaunes river

LES BICHQUES

Il s'agit d'un alevin scientifiquement nommé *Sicyopterus lagocephalus*.

C'est un tout petit poisson capable d'escalader des montagnes grâce à sa ventouse ventrale. On peut le trouver jusqu'à une altitude de 1 000 m. Sa renommée culinaire à la Réunion a aussi atteint des sommets. Chaque année, il fait l'objet de toutes les convoitises et le prix du kilo s'envole.



Le bichique : le poisson escaladeur!
The "bichique" : the climbing fish!

Rideau de palplanches
Sheet piling curtain



Crue pendant les travaux de la rivière des Fleurs Jaunes
Flood during work in the Fleurs Jaunes river



Prise d'eau de la rivière du Mât. Rideau de protection pendant la réalisation des plots 2 et 3
Water intake in the Mât river. Protective screen during the construction of blocks 2 and 3



Terrassements acrobatiques
Acrobatic earthworks



- RH = rayon hydraulique (RH = section mouillée/périmètre mouillée (m))

- p = gradient hydraulique de l'écoulement. Pratiquement, c'est la pente de l'ouvrage

- S = section mouillée de l'ouvrage (m²).

En adoptant les valeurs suivantes correspondant à un niveau de la rivière égal au niveau supérieur des palplanches :

- K = 20 (donné dans le rapport hydrologique)

- P = 0,021

- S = 24 m²

- RH = 1,589 m

On obtient :

- V = 3,95 m/s

- Qc = 94,73 m³/s

Ce débit est supérieur à celui de la crue d'occurrence quinquennale hors période cyclonique.

En phase 3, l'eau est détournée grâce à une ouverture provisoire de 2 m par 2 m par la passe à bichiques.

Le débit capable maximum a été calculé avec la formule :

$$Q = \frac{2}{3} \cdot c \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot Z^3} \cdot \left[\left(1 + \frac{b}{Z}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(1 - \frac{b}{Z}\right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

où :

Z : profondeur du centre de l'orifice,

a : la largeur de l'orifice,

b : sa demi-hauteur,

c : coefficient de forme.

Nous avons obtenu un débit maximal quand le niveau de la rivière était égal au niveau supérieur des palplanches égal à : Qc = 15,9 m³/s.

Ce débit inférieur à la valeur d'occurrence quinquennale était cependant admissible quand on considérait la faible durée des travaux à réaliser. Le risque éventuel était alors pris par l'entreprise. Le rapport hydraulique indique que pour un débit inférieur à 30 m³/s il n'y a pas de risque de charriage. Pendant la période de travaux en rivière – hors période cyclonique, soit d'avril à décembre – le débit moyen maximum est d'environ 5 m³/s.

Rideau de palplanches

Nous avons retenu le principe de réalisation de palplanches en PU25 pincées par paires.

Pour limiter les venues d'eau nous avons prévu d'ancrer les rideaux de palplanches de 3 m minimum dans la couche supérieure.

■ TERRASSEMENTS

La réalisation de ces ouvrages nécessite des terrassements importants :

◆ terrassements à l'explosif depuis le haut avec un talus définitif à 5 vertical pour 1 horizontal en zone courante ;

- ◆ terrassements acrobatiques réalisés par des alpinistes professionnels en rive droite de la rivière, dans les zones d'ancrage du seuil dans la falaise et du divergent amont ;

- ◆ terrassements souterrains à l'explosif pour la réalisation du chenal d'aménée.

En phase travaux, un grillage de protection est mis en place afin de retenir les éboulements généralement consécutifs aux épisodes pluvieux et aux tirs successifs.

Les talus sont renforcés par les clous dans les zones où l'état de la roche peut faire craindre des chutes de blocs rocheux sur du personnel travaillant en contrebas.

Réalisation de la prise d'eau de la rivière du Mât

Les terrassements généraux du dessableur, de la passe à bichiques et de la piste rive gauche, ont été réalisés en déblais à raison de 18 000 m³ en terrain meuble et de 38 000 m³ en terrain rocheux et en remblais pour 12 000 m³. Les matériaux ont été mis en dépôt définitif à une distance de 700 m, sur la plate-forme supérieure. Les multiples résurgences d'eau que l'on trouve tout le long du projet en rive gauche ont été collectées dans un fossé longitudinal en contre-haut des terrassements pour être rejetées en aval.

La proximité d'habitations a nécessité de mettre en œuvre des mesures conservatoires pour éviter d'éventuelles contestations de la part de leurs occupants.

Les terrassements du seuil, divisé en trois plots, ancré à 5 m en dessous du niveau du lit de la rivière, ont été réalisés en deux phases :

- ◆ la première phase exécutée à l'abri d'un rideau de palplanches permet la réalisation du plot 1. Ce rideau été réalisé par encastrement et scellement au béton des palplanches dans une tranchée minée ;

- ◆ la seconde phase, pour la réalisation des plots 2 et 3, la rivière a été dérivée dans la passe à bichiques par un sas provisoire, à l'abri d'un deuxième rideau, le premier rideau ayant été déposé. Les déblais de l'encastrement du seuil en rive droite ont été réalisés en acrobatique pour un volume de 700 m³.

Réalisation de la prise d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes

Contrairement à la première prise, les plots d'extrémité du seuil sont réalisés en même temps. Pour ce faire, il a été mis en œuvre deux rideaux de palplanches entre lesquelles passe la rivière. Ces deux plots terminés, la rivière est détournée comme précédemment par la passe à bichiques, permettant ainsi la construction du plot central.

Les terrassements en déblais à proximité des ha-



Prise d'eau de la rivière du Mât. Ensemble des terrassements

Water intake in the Mât river. Overall view of earthworks



Réalisation de la prise d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes

Construction of the water intake in the Fleurs Jaunes river

bitations ont nécessité la réalisation de 300 m de mur de soutènement de 3 à 8 m de hauteur. Les déblais en terrain meuble sont de 50 000 m³ et en terrain rocheux de 12 000 m³ et les remblais de 13 500 m³.

Une plate-forme a été aménagée pour les installations secondaires sur laquelle on trouve les locaux d'hygiène et de sécurité, l'aire de ferrailage et l'aire de préfabrication béton.

Les terrassements généraux des ouvrages hormis ceux du plot encastré rive gauche du seuil sont constitués de 21 000 m³ en terrain rocheux. Les déblais de l'encastrement du seuil en rive gauche ont été réalisés en acrobatique pour un volume de 2 700 m³.

Les matériaux issus des déblais sont transportés sur un dépôt situé à 1 800 m du chantier en transitant par une route communale limitée à 20 t.

cée à poste fixe au-dessus. La voie de grue située au droit de la rampe d'accès est démontée pour permettre sa réalisation.

La charge unitaire a été déterminée pour limiter la vitesse particulaire prévisible au droit de la grue à 100 mm/s.

Cette vitesse a été déterminée par une loi de propagation de type "Chapo" :

$$V = K (D/Q)^\alpha$$

Cela a conduit à :

- ◆ une charge par trou de 1,25 kg (en tenant compte d'un coefficient de sécurité de 2 sur la charge) ;
- ◆ une modification de la méthodologie de creusement.

Les cyclones nécessitent de renforcer les systèmes de stabilité des grues. Ils sont calculés avec une vitesse de vent de 240 km/h.

Prise d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes

Comme pour l'ouvrage de rivière du Mât, les travaux de gros œuvre se font avec deux grues à tour de plus de 40 m de hauteur sous crochet et avec une flèche de 65 m pour l'une et 40 m pour l'autre. Les deux grues sont surlestées pour résister à des vents de 240 km/heure. Mais ces deux grues dépassant la hauteur limite, la première, montée sur châssis fixe, a dû être ancrée sur quatre massifs béton de plus de 32 t chacun. La deuxième grue étant sur boggie, elle a dû être haubanée. Chaque grue est alimentée en béton par des toupies qui chargent sur la centrale de la rivière du Mat. La route communale d'accès étant limitée à 20 t, le volume de béton transporté est de à 3,75 m³ maximum par camion.

■ RÉALISATION DES OUVRAGES

La réalisation du gros œuvre, soit 12000 m³ de béton et 350 t d'armatures s'est faite par l'intermédiaire de deux grues à tour.

Pour les opérations de bétonnage, la première grue prenait directement le béton sous la centrale avec une benne de 2 m³ et, soit bétonnait dans la zone qu'elle couvrait, soit alimentait une trémie agitatrice de 6 m³ qui desservait la deuxième grue. Le coffrage s'effectuait à l'aide de banches métalliques Hussor pour les parties courantes, et de coffrages bois réalisés dans l'atelier de menuiserie du chantier pour les structures particulières telles que la voûte du chenal d'amenée ou de l'amorce de galerie, la margelle du puits de chute et autres coffrages traditionnels.

La rivière du Mat et la rivière Fleurs Jaunes charriant à elles deux une estimation de 200 000 à 1 million de mètres cubes de matériaux de toutes dimensions par an, il est nécessaire de protéger la crête du seuil par un blindage de 20 mm d'épais-



Réalisation de la prise d'eau de la rivière des Fleurs Jaunes

Construction of the water intake in the Fleurs Jaunes river



Pose des armatures du plot 1

Placing the reinforcements for block 1

Mise en place des tôles de protection sur un seuil

Setting up protective sheets on a weir



seur en acier au manganèse d'une dureté Brinell supérieure à 300.

La fosse de prise d'eau étant la plus sollicitée, elle est revêtue de deux coques de 10 mm d'épaisseur, la coque superficielle étant ainsi renouvelable. Le chenal d'amenée et l'entrée et la sortie du dessableur sont eux protégés par un blindage de 15 mm d'épaisseur. L'ensemble des blindages mis en œuvre pour un captage est de 120 t.

■ FORMATION DU PERSONNEL

Dans le cadre de ce chantier, l'entreprise a mis en place avec l'aide de l'AFPA et de l'ANT, une opération de recrutement et de formation de jeunes Réunionnais pendant l'année 2003.

ABSTRACT

Transfer of the Salazie waters on Reunion Island. Water intakes in the Mât River and the Fleurs Jaunes River

Ch. Rousseau, I. Amami, Ch. Batoux, J. Mossot

To allow a water supply necessary for the development of the western coastline of Reunion Island, the "Conseil général" (County Council) decided to carry out a Herculean project to transfer waters from east to west, from the circuses of Mafate and Salazie, by digging 30 km of galleries.

The following two articles describe the last part of this project : transfer of water from the Salazie circus. It required driving two tunnel galleries 3.20 m in diameter and of total length 18.1 km, and developing the two water intakes in the Mât and Fleurs Jaunes rivers. Due to the volcanic nature of the land on the island, the geological conditions were extremely unfavourable, and greatly interfered with driving of the galleries.

Given the high level of rainfall in the Salazie circus, water control had to be provided during work on the two water intakes in locations having major constraints due to their topography.

RESUMEN ESPAÑOL

Transferencia de las aguas de Salazie en La Reunión. Extracción de aguas del río del Mât y del río de las Flores Amarillas

Ch. Rousseau, I. Amani, Ch. Batoux y J. Mossot

Para permitir un abastecimiento en agua necesario para el desarrollo del litoral Oeste de la isla de La Reunión, la diputación provincial tomó la decisión de ejecutar el inmenso proyecto de transferencia de las aguas de Este hacia el Oeste, a partir de los circos de Mafate y de Salazie, con la perforación de 30 km de galería.

En los dos siguientes artículos se describen la última parte de este proyecto : la transferencia de las aguas del circo de Salazie, que ha precisado la perforación de dos galerías de 3,20 m de diámetro y de una longitud total equivalente a 18,1 km, así como las dos extracciones de agua de los ríos del Mât y de las Flores Amarillas.

El carácter volcánico de los terrenos de la isla ha originado condiciones geológicas particularmente desfavorables que vinieron a perturbar considerablemente la perforación de las galerías.

La importancia pluviométrica del circo de Salazie ha impuesto asegurar un control de las aguas durante las obras de ambas extracciones en emplazamientos que presentan fuertes imperativos derivados de su topografía.

Liaison ferroviaire Lyon-Turin

La descenderie de Saint-Martin-la-Porte

L'article décrit le déroulement des travaux de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte réalisée dans le cadre du projet de liaison ferroviaire transalpine Lyon-Turin.

Cette galerie de 2065 ml de long a une section de 80 à 100 m². La couverture maximale atteinte à l'extrémité du projet est de 600 m.

Cette galerie de reconnaissance de grande section permet d'étudier le comportement des terrains délicats du point de vue géotechnique et notamment des schistes houillers.

La descenderie de Saint-Martin-la-Porte est la première, en partant de Saint-Jean-de-Maurienne, des quatre galeries de reconnaissances du futur tunnel de base transalpin de la nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin.

Elle est située sur la commune de Saint-Martin-la-Porte en Maurienne à 695 m d'altitude au lieu-dit le Plan des Saussaz.

Cette galerie est actuellement la seule en cours de réalisation. L'excavation de la galerie de Modane a été interrompue en 2004 et les travaux des galeries de La Praz, situés entre Saint-Michel-de-Maurienne et Modane, et de Venaus en Italie n'ont, au jour de la rédaction de cet article, pas encore commencé.

L'objectif de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte est triple.

C'est tout d'abord une galerie de reconnaissance permettant d'appréhender les conditions d'exécution des ouvrages prévus dans les zones du secteur de Saint-Martin-la-Porte, ainsi que dans les zones considérées comme délicates sur le plan géologique, hydrologique et géotechnique pour la réalisation du futur tunnel de base de 53 km. Elle doit permettre notamment d'observer le comportement des schistes houillers sous forte couverture lorsqu'ils sont traversés par un ouvrage de grande section.

Ce sera ensuite l'une des attaques nécessaires au creusement du tunnel de base puis, en phase d'exploitation, un accès de service et de secours.

Le tracé, depuis l'entrée de la galerie, suit une courbe en légère pente montante à 1 % selon un rayon de 710 ml avant de descendre en alignement droit à 7,8 % pour atteindre le niveau du futur tunnel de base perpendiculairement à celui-ci. La couverture maximale est alors de 600 m (photo 1).

Le maître d'ouvrage Lyon-Turin Ferroviaire a déclaré le groupement Razel (mandataire), Bilfinger Berger AG, Pizzarotti, GRA adjudicataire des travaux au mois d'août 2002.

GRA (Granulats Rhône Alpes) filiale de SATM assure la partie dite "traitement des matériaux" com-



Guy Cueille

DIRECTEUR DE PROJET
Razel



Loïc Thévenot

INGÉNIEUR
Razel



Jacques Triclot

REPRÉSENTANT
DU MAÎTRE D'ŒUVRE
Scetauroute



prenant essentiellement la fabrication des bétons. Le groupement Fondazioni Speciali, GD Test, sous-traitant du groupement principal est en charge de la réalisation des investigations, des traitements de terrain et des essais et mesures.

Le bureau d'étude Terrasol intervient pour le compte du groupement principal.

Le groupement de maîtrise d'œuvre est constitué par Scetauroute, Antea et Alpina.

Le creusement de la descenderie a débuté fin juin 2003. Sur les 60 premiers mètres, l'excavation a traversé un cône d'éboulis. L'avancement a été réalisé en deux étapes, d'abord la calotte du tunnel puis le stross (demi-section inférieure).

L'excavation de la demi-section supérieure s'est effectuée à l'abri de voûtes parapluies en périphérie constituées par des tubes pétroliers de 127 mm de diamètre et de 15 ml de long, associés à un traitement de la zone par injection, puis à la pose de cintres métalliques HEB 220 avec projection de bé-

Photo 1
Vue générale
des installations
de chantier
*General view
of construction plant*

Photo 2
Boulonnage du front
avec des boulons
en fibres de verre
de grande longueur

*Tunnel face bolting
with very long glass
fiber bolts*

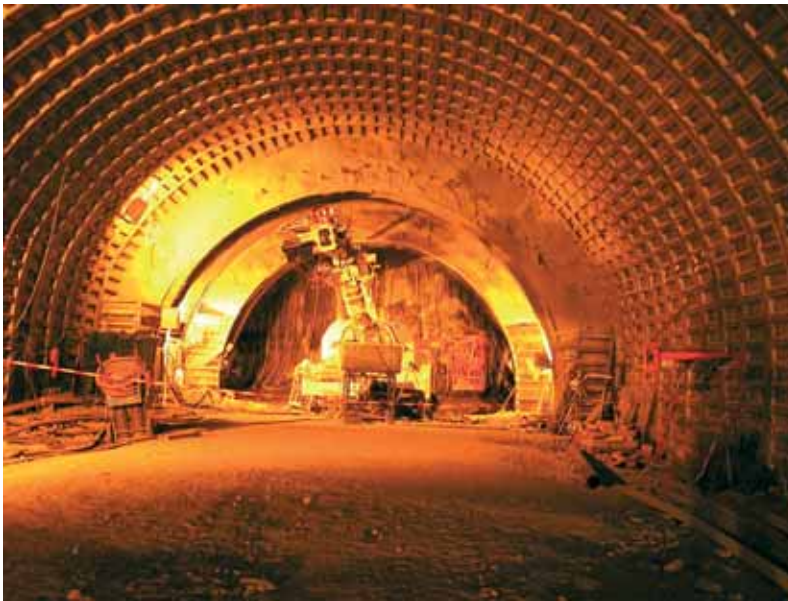


Photo 3
Foration de la volée
avec le jumbo
automatisé

*Boring of blasting holes
with the automated
jumbo*



Photo 4
Chargement
de la volée
dans une niche

*Charging the blasting
holes in a recess*



ton de remplissage : des micropieux de 8 ml de long ainsi que des ancrages latéraux de 5 ml complèterent le dispositif avant la reprise du stross (photo 2).

A cette zone de terrain meuble, a succédé une zone de calcaire et dolomie jusqu'au PM 600 puis des bancs d'anhydrite massive jusqu'au PM 800.

■ AVANCEMENT RÉALISÉ JUSQU'AU PM 800 EN PLEINE SECTION

Sur ces 700 ml, l'excavation a été réalisée en pleine section à l'explosif. Le cycle type sur ce tronçon a été le suivant :

◆ **foration de la volée** : un jumbo hydraulique à 3 bras (XL3C Atlas Copco) permet de forer en mode automatique des trous de 5,50 ml de long, suivant un plan de foration préalablement défini. Le plan de tir compte 120 trous en moyenne (photo 3) ;

◆ **chargement des explosifs** : la mise en place des explosifs commence après la fin de la foration. Les détonateurs électriques HI (haute intensité) sont raccordés aux précharges et distribués dans les trous conformément au plan de tir séquentiel choisi (photo 4) ;

◆ **tir** : la mise à feu est réalisée depuis un poste de tir situé à plus de 100 ml du front d'attaque ;

◆ **ventilation** : l'explosion donne naissance à "des fumées et gaz de tir" qui sont ventilés et expulsés du tunnel par la mise en route des ventilateurs dont le débit est de 90 m³/seconde ;

◆ **le marinage** : les déblais provenant du tir sont chargés à l'avancement, transportés sur 50 ml environ et déversés à l'aide d'une chargeuse à pneu, équipée d'un godet à déversement latéral de 5 m³ de capacité, à une cadence de 350 t/h dans un concasseur à mâchoires, qui réduit le marin en une granulométrie de 0/200 avant de le distribuer sur un convoyeur à bande qui déverse les matériaux à l'extérieur sur la plate-forme du chantier. Ces déblais sont ensuite évacués au fur et à mesure et utilisé comme remblai de protection face au chantier dans la carrière de Calypso sur la rive gauche de l'Arc. En fin de marinage, une pelle mécanique de 32 t réalise la purge des parois et du front, nécessaire pour éviter toute chute de bloc instable (photo 5) ;

◆ **soutènement** : une coque de béton projeté est appliquée sur la périphérie et éventuellement au front de la galerie. Son épaisseur varie de 5 à 20 cm en fonction de la nature du terrain.

Le chantier est équipé de sa propre centrale à béton. Le béton projeté utilisé contient également des fibres métalliques et un adjuvant accélérateur de prise qui permet d'améliorer ses performances mécaniques à court terme.

L'avancement réalisé au mois de février 2004 a été de 200 ml soit deux volées de 5 m par jour.

■ DU PM 800 AU PM 856

Le projet a rencontré, après le PM 800, le front du houiller du Briançonnais composé de grès, de schistes et de schistes charbonneux.

Les moyens d'excavation antérieurs ont été remplacés par des moyens mécaniques.

La première partie de cette zone a été traitée en section divisée avec des soutènements lourds type HEB 180. Après adaptation des soutènements et toujours sous le contrôle vigilant des tassements et convergences, l'avancement a de nouveau été réalisé en pleine section avec un soutènement constitué de béton projeté fibré associé à du treillis soudé et un boulonnage important et dense de type Swellex et autoforeur, le radier étant dans tous les cas bétonné et armé avec du treillis soudé.

Les convergences observées sur la première partie de la zone (jusqu'à 300 mm) ont nécessité de nombreuses reprises ultérieures du soutènement avec pose de boulons autoforeurs supplémentaires de 8 ml et reprise du béton projeté (photo 6).

■ DU PM 856 AU PM 980

Une zone alluvionnaire de grande puissance a été interceptée au PM 855, d'abord en voûte, puis sur l'ensemble de la demi-section supérieure. Cette difficulté a contraint l'avancement à se poursuivre de nouveau en section divisée, par passe réduite. Des auréoles d'injection ont permis de traiter les matériaux alluvionnaires à l'avancement, le front et la calotte étant renforcés par des boulons en fibre de verre injecté. L'excavation mécanique et le soutènement du front avec du béton projeté fibré à résistance immédiate garantie ont été opérés simultanément pour limiter tout risque de débouillage de grande ampleur.

Le radier de la demi-section supérieure a été bétonné et armé pour fermer la section et s'opposer aux convergences qui ont atteint par endroit 600 mm (photo 7).

■ DU PM 980 AU PM 1210

Le tracé de la descenderie a échappé à la zone alluvionnaire après le PM 980.

L'excavation s'est poursuivie dans les schistes houillers.

Les convergences observées ont permis de détecter que les caractéristiques géomécaniques de ces derniers étaient bien plus faibles que prévu, nécessitant de nouvelles adaptations des soutènements.

L'excavation s'est poursuivie en pleine section contre-voûtées avec des volées n'excédant pas 2 m. Le soutènement était constitué de cintres HEB 180 fermés espacés de 1 m, d'une coque de bé-



Photo 5
Marinage : déchargement
du marin
dans le concasseur

*Mucking : earthworks
machine discharging
into the crusher*



Photo 6
Excavation
en demi-section
supérieure
avec une pelle
de 32 t

*Excavation
in upper
half-section
with a 32-tonne
shovel*



Photo 7
Réalisation
du béton projeté
à front

*Shotcreting
on the tunnel face*

Photo 8
Déformation d'un cintre
HEB 180 sous l'effet
de la poussée des terrains
*Deformation of an HEB 180 arch
due to the effect
of ground pressure*



► ton projeté de 60 cm réalisée en trois passes et d'un radier bétonné à l'avancement. Des boulons autoforeurs de 8 ml, à raison de 10 unités/ml permirent de contenir les convergences en dessous de 80 mm.

L'épinglage du front avec des boulons en fibre de verre de grande longueur a été conservé eu égard à la hauteur de ce dernier dans un objectif premier de sécurité. Ces opérations mobilisant des fibres de verre allant jusqu'à 24 m de longueur ont été réalisées le week-end de manière systématique pour couvrir l'avancement hebdomadaire programmé.

Ce soutènement a pourtant rencontré ses limites, après le PM 1200 quand la couverture a dépassé 250 m (photo 8).

■ APRÈS LE PM 1210

Le projet a atteint, fin juin 05, le PM 1240. Un nouveau type de soutènement dit "souple" est actuellement mis en œuvre pour faire face aux fortes convergences observées. Il est constitué d'une coque de béton projeté de 15 cm d'épaisseur armé d'un treillis soudé et d'un boulonnage primaire réalisé à front sur toute la périphérie de la section. Ce boulonnage est constitué de boulons HA de 5 ml (densité : 1,5 à 1 u/m²). Un boulonnage secondaire constitué de 12 boulons autoforeurs de 8 ml est mis en place à moins de 8 m du front. Cinq saignées d'une trentaine de centimètres de large réparties en voûte sont préservées afin de créer des

zones de déformations privilégiées limitant ainsi les contraintes reprises par le soutènement. Une dernière coque de béton projeté de 20 à 30 cm d'épaisseur sera mise en œuvre après stabilisation des déformations. L'épinglage du front est constitué de 40 à 50 boulons en fibres de verre de grande longueur.

L'excavation est réalisée par passe réduite, en pleine section avec contre-voûte.

L'observation des convergences et des tassements permettront de valider ou d'infirmer ce nouveau type de soutènement.

■ AUTRES TRAVAUX SPÉCIFIQUES

Topographie

La galerie est pilotée grâce à un laser positionné sur le parement du tunnel. Après chaque volée, un relevé profilométrique permet de vérifier si l'excavation a été réalisée suivant le profil prévu. Ce contrôle permet le cas échéant de reprendre les sous-profilés ou de modifier le plan de tir en cas de hors profil.

Si le terrain se dégrade, des mesures optiques de convergences sont effectuées en relevant des cibles implantées sur la section du tunnel selon des fréquences définies en fonction de l'importance des mouvements et de la vitesse d'avancement du front.

Sondages, travaux spéciaux

Les sondages destructifs ou carottés, les travaux de confortement de terrain type boulonnage de grande longueur du front et les divers essais et mesures sont réalisés le week-end.

Environnement et contrôle de l'atmosphère

Les eaux du tunnel ainsi que les eaux de ruissellement de la plate-forme sont récupérées dans un bassin de décantation de 2 700 m³ de capacité. L'ensemble des mesures environnementales effectuées sur le chantier (eau, air, bruit, poussière...) sont suivies en permanence par l'ensemble des acteurs du projet.

Le chantier est également équipé d'un système de suivi et de contrôle très perfectionné de l'atmosphère en tunnel. Ce système déclenche une alerte en cas de détection de gaz explosifs au-delà des seuils paramétrés préalablement. L'arrêt des activités et l'évacuation de la galerie s'opèrent alors suivant une procédure très stricte. Les systèmes de détection de gaz, d'exhaure (pompage) et de communication sont conformes à la norme Atex, dernière norme appliquée aux matériels utilisés en atmosphère explosive. Le chantier est en cours de certification.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Montant initial des travaux : 41,6 millions d'euros
- Durée initiale des travaux : 25 mois
- Volume de béton : 39 000 m³
- Cintres : 2 098 t
- Tôles de blindage : 120 t
- Boulon HA : 151 t
- Boulons fibres de verre : 16 506 m
- Boulons à ancrage réparti immédiat (Swelllex) : 21 327 m
- Effectif : 110 personnes
- Travail en trois postes

C'est donc à ce jour plus de douze type de soutènements différents qui ont été mis en œuvre depuis le PM 805.

La grande implication de tous les acteurs dans la réussite du projet, le travail considérable d'analyse du comportement des terrains rencontrés et plus encore la concertation permanente du groupement d'entreprises, du maître d'œuvre et des bureaux d'études concernés ont déjà permis d'atteindre avec succès, sur le linéaire déjà excavé, le premier des objectifs de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte : être une galerie de reconnaissance.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

LTF (Lyon Turin Ferroviaire)

Maître d'œuvre

Groupement Scetauroute (mandataire), Antea, Alpina

Groupement d'entreprises

Razel (mandataire), Bilfinger Berger, Pizzarotti

Bureau d'études de l'entreprise

Terrasol

ABSTRACT

Lyons-Turin rail link. The inclined gallery of St-Martin-la-Porte

G. Cueille, L. Thévenot, J. Triclot

The following article describes the work progress of the inclined gallery of Saint-Martin-la-Porte carried out within the Transalpine Railway link, Lyon Turin project.

This is a gallery of 2065 m with a cross section between 80 and 100 m².

The maximum cover reached at the end of the project is 600 m.

The aim of boring a large section exploratory gallery was to study difficult grounds behaviour from a geotechnical point of view and particularly of the carboniferous schist.

RESUMEN ESPAÑOL

Enlace ferroviario Lyon-Turín. La descenderie de St-Martin-la-Porte

G. Cueille, L. Thévenot y J. Triclot

En el presente artículo se describe el desarrollo de las obras de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte ejecutadas en el marco de un proyecto de enlace ferroviario transalpino Lyon-Turín.

Esta galería de 2.065 m de longitud con una sección de 80 a 100 m². La cobertura máxima alcanzada en el extremo del proyecto es de 600 metros.

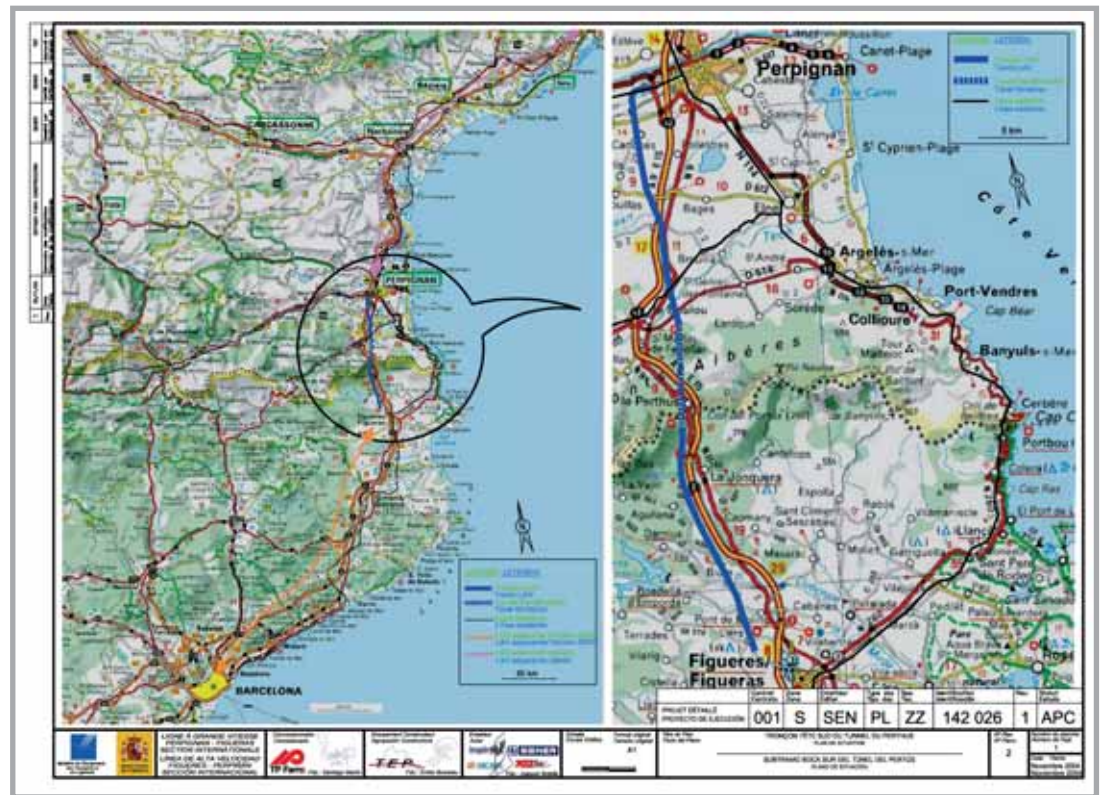
Esta galería de reconocimiento de sección grande permite estudiar el comportamiento de los terrenos delicados desde el punto de vista geotécnico y fundamentalmente de los esquistos de hulla.

Ligne ferroviaire à grande vitesse Les tunneliers du tunnel

Le contrat de concession pour la réalisation de la ligne à grande vitesse Perpignan-Figueras a été signé en février 2004 et comprend la construction de la ligne en Espagne et France respectivement sur 20 et 17 km environ, ainsi que la réalisation du tunnel de Perthus.

Cette liaison, prévue pour les trains à grande vitesse, les trains de marchandises et ferroutage dans le futur, est reliée au réseau TGV Méditerranée et à la liaison Madrid - Barcelone actuellement en construction (figure 1).

Figure 1
Plan de situation
Location drawing



LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Concessionnaire et maître d'ouvrage

TP Ferro constitué par les deux groupes Dragados et Eiffage

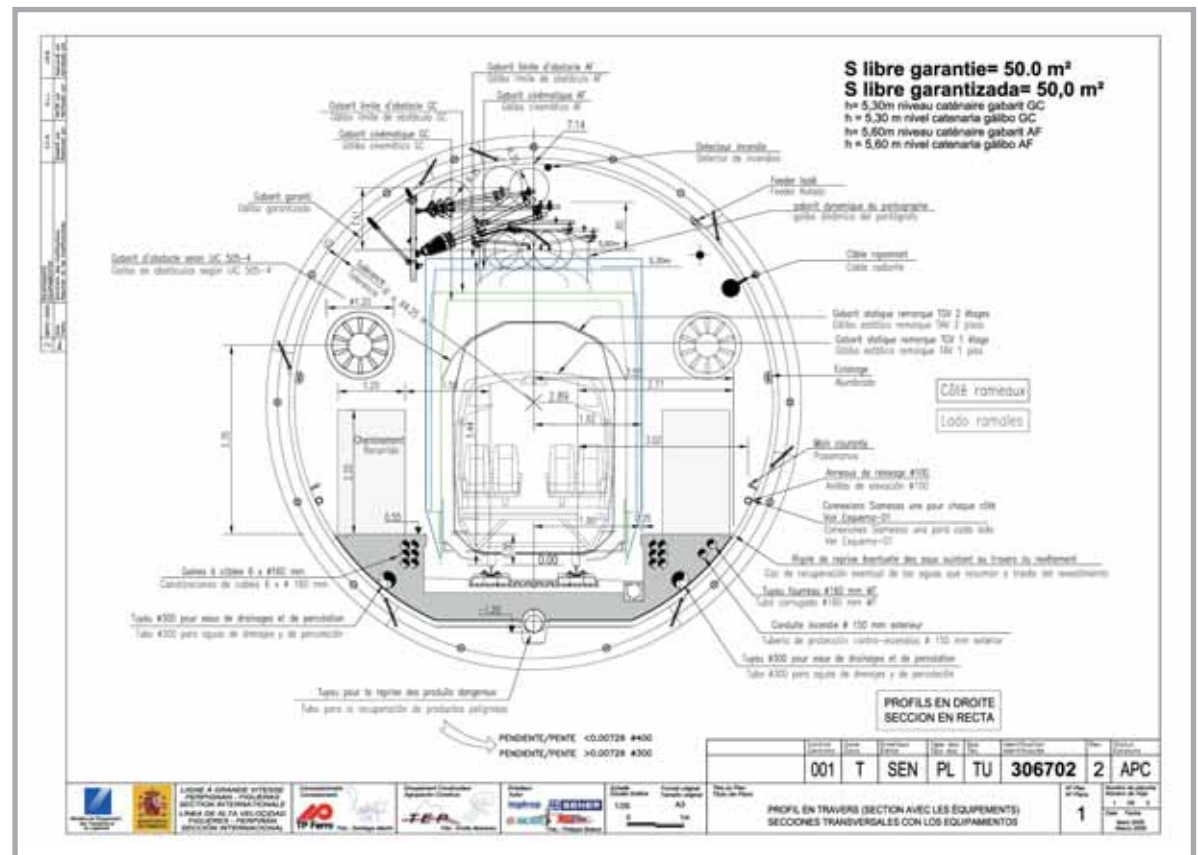
Maître d'œuvre

TEP Trans Euro Pyrénées constitué de Dragados et Eiffage TP et d'un groupement d'ingénieries Ingérop-Arcadis-Sener et Tuccrail

Entreprises

Eiffage TP et Dragados

Figure 2
Coupe sur section courante avec train
Cross section on continuous section with train



Perpignan-Figueras du Perthus

■ DESCRIPTION DU LOT TUNNEL

Liste des ouvrages

Le lot "Tunnel du Perthus" comprend la réalisation des ouvrages suivants :

- ◆ deux tunnels de diamètre 8,70 m fini, de longueur 8 200 m environ, réalisés au moyen de deux tunneliers et revêtus en voussoirs préfabriqués ;
- ◆ une fenêtre et une galerie de reconnaissance donnant accès au milieu du tracé des tunnels ;
- ◆ des rameaux de connexion entre les tunnels (41 rameaux de sécurité de longueur 15 m et section 15 m² environ et quatre rameaux techniques de section 25 m²) ;
- ◆ les ouvrages béton de têtes sous forme de faux tunnels remblayés en définitif, et avant tunnels de longueur 100 m environ sur chaque tête ;
- ◆ les ouvrages en tunnel (béton sous ouvrages en tunnel, voie, réseaux et bétons de quais) (figure 2).

Terrains traversés

La géologie du site fait apparaître les massifs suivants, du sud au nord :

- ◆ les granites et les granodiorites du Perthus sur 2 500 m environ ;
- ◆ les schistes verts et granitoides des Albères sur 2 500 m incluant une zone de faille sur 1 100 m environ ;
- ◆ les gneiss et diorites de Marseillas - Les Cluses sur 2 200 m ;
- ◆ les schistes noirs de Montesquieu sur les derniers 1 000 m.

Le tunnel est excavé avec un recouvrement de 100 à 200 m et la charge due à la nappe phréatique peut atteindre 180 m dans les zones fracturées.

Les installations générales

Après les procédures administratives d'occupation des terrains à la tête sud située en Espagne les plates-formes d'installation ont été excavées avec les terrassements à ciel ouvert de la tête des tunnels (photo 1). Les installations comprennent :

- ◆ les ateliers, magasin, bureaux et vestiaires ;
- ◆ la bande transporteuse d'évacuation des déblais ;
- ◆ la centrale à béton pour la préparation des mortiers de bourrage et béton sous voie ;
- ◆ la zone de stockage et changement des voussoirs ;
- ◆ l'ensemble des voies pour chargement des trains d'approvisionnement des tunnels ;



Photo 1
Tunnelier en position
de démarrage
*Tunnel boring machine
in starting position*

- ◆ la station de production d'électricité avant raccordement au réseau EDF en France ;
- ◆ les équipements de démarrage du tunnelier.

■ LES TUNNELIERS (photo 2)

Choix des machines - Cahier des charges

Le tunnelier a été conçu et fabriqué par la société allemande Herrenknecht à partir du cahier des charges établi par le groupement du tunnel.

Le site des tunnels du Perthus présentait les caractéristiques suivantes :

- ◆ terrains rocheux durs et abrasifs mais souvent fracturés de natures diverses (granites, gneiss ou schistes) ;
- ◆ tracé quasi rectiligne avec des courbes de très grand rayon (8 000 m) ;
- ◆ recouvrement de l'ordre de 200 m, sous nappe, mais perméabilité faible en général ;
- ◆ présence de failles avec terrains tectonisés et broyés avec pression d'eau élevée possible ;
- ◆ reconnaissances par sondages carottés verticaux ou inclinés (environ 60 sondages sur linéaire du tunnel).

En conséquence, le chantier a décidé l'utilisation de deux boucliers au rocher. Ces machines peuvent fonctionner dans les terrains de bonnes caractéristiques en se grippant au terrain pour réaliser l'avancement pendant que la pose de l'anneau se fait dans le bouclier arrière.

Dans les terrains de qualité médiocre, le fonctionnement se fait en simple bouclier en appui sur le dernier anneau posé.



Photo 2
Tunnelier en usine avec le groupe
*Tunnel boring machine in factory
with the group*



Photo 3
Tunnelier
+ structure
TBM
+ structure

Fonctions (photo 3)

Les tunneliers sont équipés des systèmes suivants :

- ◆ injection de bourrage de mortier gravette et coulis, en continu dès la sortie de l'anneau du bouclier ;
- ◆ équipement de sondage de reconnaissance et de réalisation de forages pour drainage, voûtes parapluie ou injection de consolidation en voûte.

Les caractéristiques principales des deux tunneliers sont les suivantes :

- diamètre excavé 9,96 m ;
- longueur du bouclier 13,50 m ;
- longueur du tunnelier complet environ 150 m ;
- puissance de rotation de la tête 4 500 kilowatts ;
- poussée totale maximum 11 000 t.

Logistique

Le marinage est assuré par convoyeur à bandes de capacité 1 100 t/h jusqu'à l'extérieur où il sera repris pour l'utilisation sur le projet, pour la fabrication des bétons ou pour mise en remblais.

L'approvisionnement des machines est réalisé par train, de capacité équivalente à deux anneaux, en voussoirs, matériau de remplissage de vide annulaire et réseaux.

Le creusement s'effectuant en grande partie en descendant, un système de pompage permanent et exceptionnel de capacité totale 1 000 m³/h par tunnel, est prévu (figure 3).

ETAT DU CHANTIER DE CREUSEMENT

La commande des tunneliers a été passée en avril 2004, et la première machine a été transportée et montée sur chantier durant le printemps 2005, pour un démarrage de creusement courant juillet.

La seconde machine est en cours de montage sur chantier, pour un démarrage du creusement en septembre.

ABSTRACT

Perpignan-Figueras high-speed railway line. The tunnel boring machines for the Perthus tunnel

J.-Fr. Thibault, M. Ducrot

The concession contract for construction of the Perpignan-Figueras High-Speed Train Line was signed in February 2004 ; it consists chiefly of construction of the line in Spain and France, over distances of about 20 and 17 km respectively, and construction of the Perthus tunnel.

This link, designed for "TGV" high-speed trains, goods trains and rail-road transport in the future, is connected up to the Mediterranean "TGV" network and the Madrid-Barcelona link currently undergoing construction.

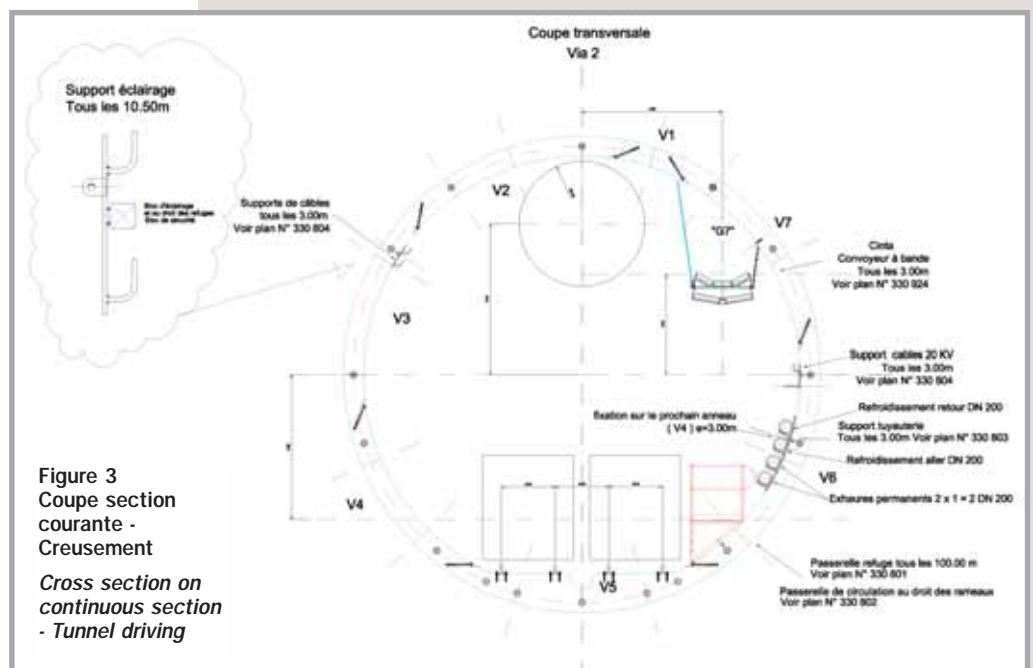
RESUMEN ESPAÑOL

Línea de ferrocarril de alta velocidad Perpiñán-Figueras. Las tuneladoras del túnel del Perthus

J.-Fr. Thibault y M. Ducrot

El contrato de concesión para la ejecución de la línea de alta velocidad Perpiñán-Figueras se firmó en febrero de 2004 e incluye principalmente la construcción de la línea en España y Francia respectivamente sobre 20 y 17 km aproximadamente, así como la ejecución del túnel de Perthus.

Este enlace, previsto para los futuros trenes de alta velocidad, los trenes de cargas y transporte combinado, se ha puesto en comunicación con la red de trenes de alta velocidad Mediterráneo y el enlace Madrid - Barcelona actualmente en construcción.



Tunnels de CLP à Hong Kong

Conception et construction de tunnels de faible section dans le granite

Dans le cadre de la modernisation du réseau électrique de Hong Kong, Bouygues Travaux Publics, en association avec sa filiale Dragages Hong Kong, réalise en conception et construction plus de 5 km de tunnels répartis sur quatre sites différents. Ces projets sont soumis à des contraintes environnementales importantes, liées à leur situation géographique, à la réglementation locale et à certaines conditions originales du contrat. L'article décrit les deux principaux tunnels réalisés dans le granite et leur mode de construction dans cet environnement contraignant.

Edmond Wong
DIRECTEUR DE PROJET
Dragages HK

Peter Ip
DIRECTEUR ADJOINT DE PROJET
Dragages HK

Andy Raine
RESPONSABLE PRODUCTION
DU TUNNEL DE CHI MA WAN
Dragages HK

Francis Vallon
SERVICE MÉTHODES ET PRIX
Bouygues Travaux Publics

A Hong Kong et dans les Nouveaux Territoires, "CLP Power", principal distributeur privé d'énergie, construit régulièrement de nouvelles infrastructures afin d'augmenter la fiabilité et l'efficacité de son réseau électrique.

Que les projets soient situés en zone urbaine dense ou sur une île avec quelques villages de pêcheurs, l'environnement et l'écologie prennent une place primordiale dans la définition des tracés, mais aussi pour la réalisation des travaux. Soucieuse de son image de marque locale, "CLP Power" met en place des contrats originaux pour transférer aux entreprises de construction la responsabilité de ces contraintes, tout en maîtrisant les coûts des ouvrages. Cela consiste en la mise en place d'une mesure mensuelle d'indicateurs clefs, directement liés aux termes de paiement. Les pénalités liées à ces conditions peuvent représenter jusqu'à 5 % du marché. Exemple de ces indicateurs clefs :

- ◆ minimiser l'impact de la construction sur l'environnement ;
- ◆ développer le management des risques ;
- ◆ maintenir une bonne relation avec la communauté et une bonne image de marque.

Face à ces contraintes fortes la direction du projet a anticipé, pendant la phase de conception, l'organisation, les installations et l'impact environnemental du chantier.

■ TUNNEL DE CHI MA WAN

Présentation

Les nouvelles lignes électriques d'alimentation de l'île de "Cheung Chau" doivent être enterrées sur tout leur tracé de 10 km car elles traversent la péninsule de "Chi Ma Wan" protégée sur le plan environnemental (figure 1). Partant de la station

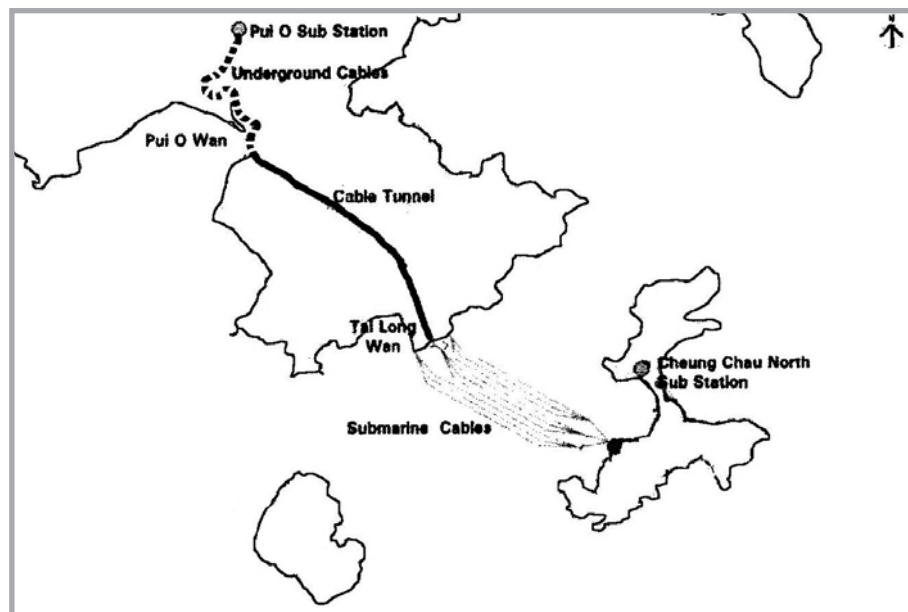


Figure 1
Situation du tunnel de Chi Ma Wan
Location of the Chi Ma Wan tunnel

d'alimentation de l'île "Cheung Chau", les lignes passent en tranchées jusqu'au portail nord du tunnel "Pui O Wan", situé au bord d'une plage. Elles traversent la péninsule de "Chi Ma Wan" dans un tunnel long de 3,2 km avant de relier l'île à l'aide de câbles sous-marins.

Le lot de Chi Ma Wan est composé :

- ◆ du tunnel d'une section de 8,5 m², excavé au tunnelier à roche dure ;
- ◆ de quatre baies de jonction des câbles électriques, de 10,5 m² sur 30 m, réparties le long du tracé ;
- ◆ des portails nord et sud ;
- ◆ des revêtements intérieurs et équipements électriques et mécaniques.

Le portail sud du tunnel est situé sur une côte escarpée et sauvage, et débouche 6 m au-dessus du niveau de la mer. Le creusement au tunnelier est réalisé de ce côté depuis une plate-forme à créer en mer.

Initialement, tous les travaux de bétonnage devaient être réalisés et approvisionnés depuis un chemin d'accès menant au portail nord. Cette solution a

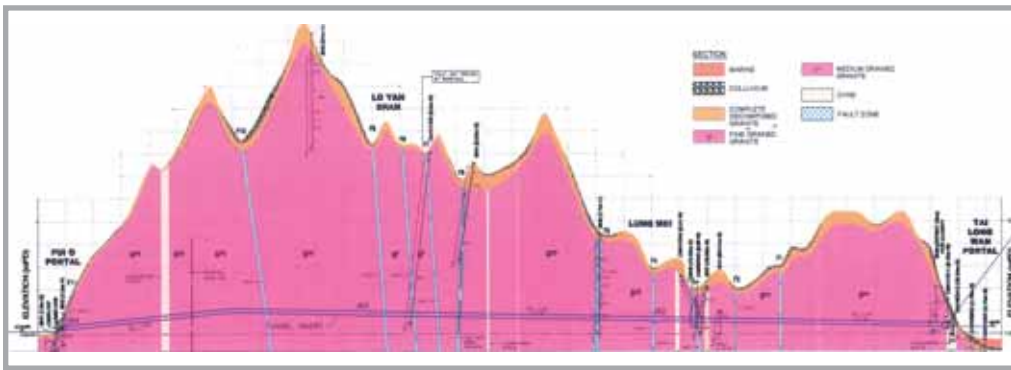


Figure 2
Coupe géologique du tunnel de Chi Ma Wan
Geological cross section of the Chi Ma Wan tunnel

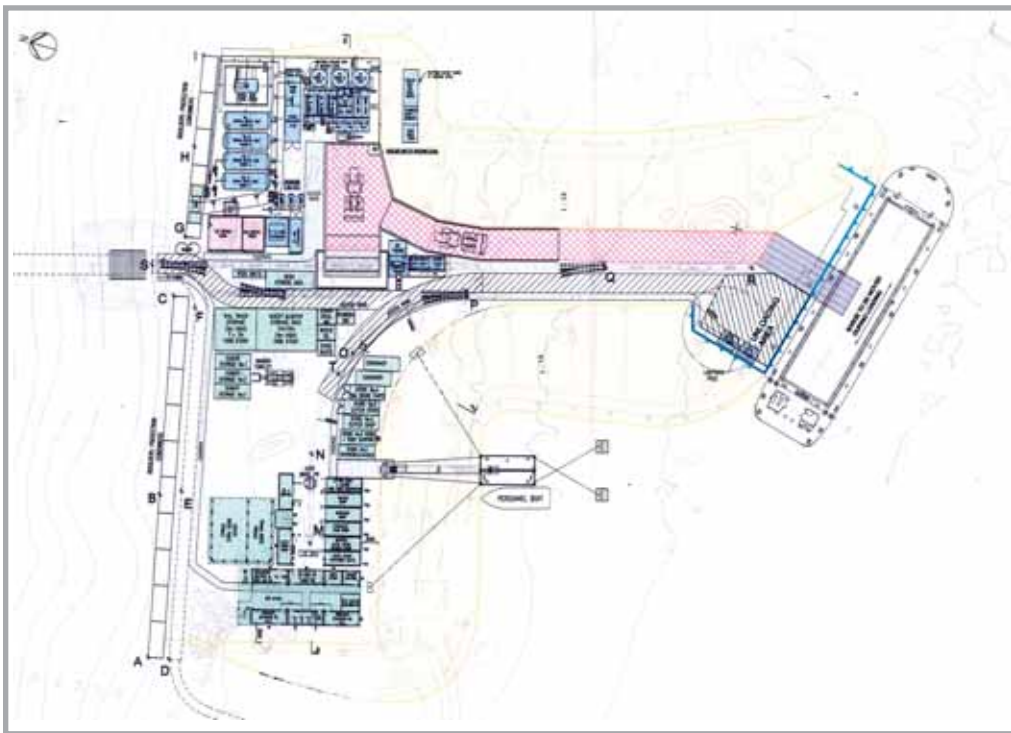


Figure 3
Plan d'installation de la plate-forme en mer du tunnel de Chi Ma Wan
Layout drawing of the offshore platform for the Chi Ma Wan tunnel

déclenché une pétition des riverains, et bien que peu nombreux, le Client a dû modifier le projet. Un accord a été finalement trouvé entre le Client, le gouvernement et les résidents de Lantau afin de limiter l'accès terrestre au portail nord à la seule réalisation de celui-ci. Tous les travaux d'excavation et de bétonnage des ouvrages en tunnel doivent être réalisés depuis la plate-forme en mer côté sud.

Géologie

Le tunnel traverse le massif rocheux de la péninsule, composé principalement de granite dur à très dur avec des grains de taille moyenne et faiblement fracturé (figure 2). Il contient des inclusions de rhyolite feldspathique, de basalte et d'aplite. La couverture rocheuse du tunnel est importante avec des hauteurs allant jusqu'à 275 m. Le tracé du tunnel coupe de nombreuses failles. La présence d'un réservoir naturel d'eau potable à 400 m du tracé a nécessité des reconnaissances complémentaires pour vérifier qu'il n'était pas en communication avec le tunnel.

Les failles sont jointives avec des venues d'eau d'infiltration ou de faible débit. La plus importante faille est située à 900 m du portail avec une faible couverture de 25 m et composée d'une série de dykes basaltiques.

Le creusement du tunnel n'a finalement nécessité aucun traitement du front de taille et/ou traitement particulier de venues d'eau.

Les portails sont situés dans des formations granitiques complètement décomposées et recouvertes de couches métriques de colluvions avec inclusion de blocs rocheux de grande taille. Les mesures de surveillance de ces blocs en début de chantier ont montré la nécessité de stabiliser provisoirement 150 d'entre eux pendant la durée des travaux.

Etudes

Dès la mise en vigueur du contrat en conception construction, la direction du projet a organisé les études en deux pôles, l'un pour l'optimisation du projet, l'autre pour les études d'exécution.

Le bureau d'études intégré de l'entreprise Dragages à Hong Kong conduit les études d'optimisation de l'ouvrage. De nombreuses pistes d'optimisation, portant aussi bien sur les structures que sur les méthodes de construction, sont étudiées avec l'aide du Client pour intégrer ses contraintes d'exploitation. Parmi les plus significatives et acceptées, nous pouvons citer :

- ◆ réduction du diamètre de l'excavation de 3,5 m à 3,3 m ;
 - ◆ modification de la répartition des baies de jonction des câbles électriques, aboutissant à la suppression en tunnel de l'une d'entre elles ;
 - ◆ réduction de la taille du portail côté sud ;
 - ◆ remplacement du radier béton aménagé avec des compartiments fermés de dalles par des fourreaux noyés dans un remblai drainant.
- Les études d'exécution et géotechniques sont amenées par le bureau d'études Mott Connell Ltd.

Installations

La conception des installations de chantier, sur une plate-forme gagnée sur la mer, a été un élément important pour la réussite du chantier. Pour des raisons d'impact écologique et de coût, la surface devait être minimale, tout en permettant le démarrage du tunnelier à roche dure, les approvisionnements pendant les différentes phases du chantier et l'évacuation des déblais. De plus, elle était soumise à de nombreuses contraintes, telles que :

- ◆ proximité d'un chenal de navigation très fréquenté, limitant les conditions d'accès ;
- ◆ présence de rochers affleurants ne permettant pas de créer un quai protégé de la houle ;
- ◆ obligation en cas d'alerte typhon de mettre en sécurité les installations et d'évacuer le personnel.

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Tunnel Chi Ma Wan

- Longueur du tunnel : 3242 m
- Longueur forée au tunnelier : 3173 m
- Couverture rocheuse maximale : 275 m
- Diamètre excavation : 3,3 m
- Section excavée : 8,5 m²
- Excavation : 27 700 m³
- Etanchéité : 10 300 m²
- Béton projeté : 1 300 m³

La plate-forme est constituée d'enrochements, de bloc béton et de remblais. Elle est démontée en fin de chantier et les terrains sont rendus dans leur état initial.

La forme retenue pour la plate-forme (figure 3) est un T dont le côté supérieur est accolé à la côte. La partie "horizontale" du T contient les installations générales, ateliers, centrale à béton, stockage de l'eau, production d'énergie et traitement des eaux usées. La partie "verticale" du T permet le déchargement du train de marinage, à l'aide d'un retourneur situé au-dessus d'une fosse. Les déblais sont repris au chargeur et vidés dans une barge située en extrémité de la plate-forme (photos 1 et 2). Ils sont transportés à une carrière pour créer des voies temporaires.

Cette installation limitée à 4 200 m² a permis une réduction du volume des remblais, tout en assurant la réalisation du chantier dans des conditions tout à fait satisfaisantes.

Réalisation des portails et des amorces

Due à la présence des mauvaises conditions géologiques au portail nord, une amorce est réalisée manuellement avec l'utilisation de plaques de blindage. Elle permet de créer sur 9 m un tube de 3,80 m de diamètre prolongé par une chambre de 4,75 m de diamètre sur 14 m. Cette dernière sert en phase définitive au local ventilateurs, et en phase provisoire à l'arrivée et au démontage du tunnelier.

Au sud l'entrée du tunnel est aménagée avec des talus blindés par 130 boulons d'ancrage de 20 m de longueur. L'amorce du tunnel située dans une faille et des roches tendres doit servir aussi au démarrage du tunnelier à roche dure afin d'assurer un front de taille stable dans le massif rocheux adjacent.

Une solution originale est mise en œuvre par le chantier afin de limiter la longueur d'excavation de l'amorce et permettre le démarrage du tunnelier à l'aide des grippeurs sans les appuyer dans le rocher : l'excavation manuelle est blindée à l'aide de cintres métalliques annulaires posés à l'avancement et injectés derrière pour stabiliser le terrain (photo 3). Elle est arrêtée dès la rencontre des roches dures. Pour le démarrage du tunnelier, après ripage de celui-ci dans l'amorce, les grippeurs sont bloqués contre les cintres métalliques circulaires, qui reprennent les efforts de démarrage du tunnelier.

Durant toutes les phases de construction du tunnel, la tête de l'amorce est recouverte d'une zone d'amortissement de 10 m de largeur prolongée par une barrière anti-avalanche (photo 1) pour prévenir tout risque accidentel de chute des blocs rocheux instables (en plus des dispositions décrites au chapitre géologie).



Photo 1
Plate-forme de démarrage du tunnelier de Chi Ma Wan
Starting platform for the Chi Ma Wan tunnel boring machine



Photo 2
Plate-forme sud du tunnel de Chi Ma Wan vue depuis la mer
Southern platform of the Chi Ma Wan tunnel seen from the sea



Photo 3
Portail sud du tunnel de Chi Ma Wan et amorce du tunnel
South portal of the Chi Ma Wan tunnel and start of the tunnel face

CALENDRIER D'EXÉCUTION ET DÉLAIS

Tunnel Chi Ma Wan

- Ordre de service : 18 avril 2002
- Disponibilité des terrains : 11 août 2003
- Plate-forme et installation de chantier : 6 mois
- Montage tunnelier : 2 mois
- Excavation du tunnel : 8 mois
- Repli du tunnelier : 2 mois
- Revêtement du tunnel : 3,5 mois
- Radier et équipements : en cours depuis juin 2005
- Livraison du chantier : prévue pour fin février 2006

Photo 4
Tunnelier
de Chi Ma Wan
*Chi Ma Wan tunnel
boring machine*



Excavation au tunnelier à roche dure

Le tunnelier utilisé pour l'excavation est du type roche dure à appui radial à l'aide de gripeurs (photo 4). De fabrication Robbins, il est loué à une entreprise européenne, et présente les caractéristiques suivantes :

- ◆ longueur totale y compris le train suiveur : 210 m ;
- ◆ longueur de la tête et de la partie entraînement : 5 m ;
- ◆ marinage par tapis et chargement des berlines à 140 m du front ;
- ◆ double voie de berlines sur le train suiveur, manœuvrées automatiquement, permettant d'apporter un convoi vide, de le décrocher, de reprendre avec la même locomotive le convoi chargé de déblai et de le tracter jusqu'au retourneur, situé sur la plate-forme de départ ;
- ◆ pose d'un radier provisoire pour le roulage des remorques arrière et des trains d'approvisionnement.

La pente du tunnel de 0,5 % et 2,60 % sur les derniers 600 m, associée à la longueur d'excavation de 3 km et à la faible section du tunnel, nécessite la mise en place de deux gaines de ventilation et de dispositifs d'accrochages spécifiques pour ne pas interférer avec les trains d'approvisionnement (figure 4).

Afin de réduire la température ambiante dans le tunnel (40° C prévisible), l'air neuf soufflé dans les ventubes est refroidi dans un échangeur et la température en tunnel est ramenée à 32° C.

Les conditions de démarrage du tunnelier avec la

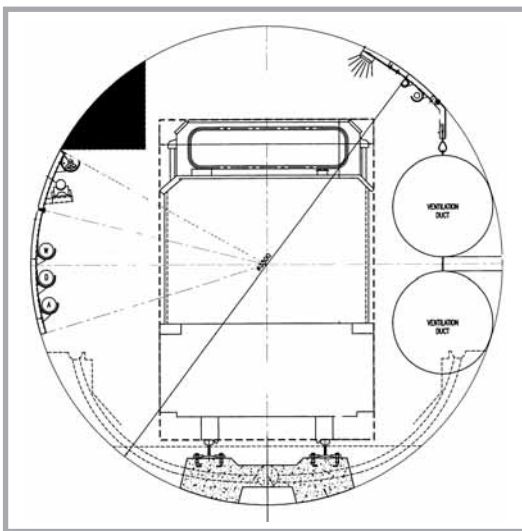


Figure 4
Section type en cours
de creusement
du tunnel
de Chi Ma Wan

*Typical cross
section during
Chi Ma Wan tunnel
driving*



Photo 5
Percement du tunnelier de Chi Ma Wan
Drilling by the Chi Ma Wan tunnel boring machine

Photo 6
Démontage du tunnelier
dans l'amorce nord
du tunnel de Chi Ma Wan
*Dismantling the TBM
at the start
of the northern face
of the Chi Ma Wan tunnel*



plate-forme de longueur réduite et l'amorce du tunnel ont nécessité huit phases de montage et de reconfiguration du train suiveur et des installations, pour que celles-ci soient complètement opérationnelles.

L'excavation du tunnel s'est déroulée dans de bonnes conditions et les soutènements provisoires mis en œuvre se sont limités à des boulonnages ponctuels et à des plaques de treillis soudés au droit des intrusions. Après le percement (photo 5) et la démobilité du tunnelier, les élargissements de l'excavation pour les baies de jonction des câbles électriques, sont réalisés en traditionnel à l'explosif.

Le démontage du tunnelier est réalisé principalement par le recul de toutes les remorques au travers du tunnel et leur colisage et évacuation par la plate-forme en mer. La tête de coupe et la motorisation du tunnelier sont démontées dans l'amorce nord (photo 6) et devaient être transportées par route depuis le portail nord. Mais après 5 mois de démarches auprès des administrations et des riverains, cette solution fut rejetée. Ces éléments du tunnelier sont finalement levés et transportés par une barge Ro-Ro capable de s'échouer sur la plage (figure 5 et photo 7), et ramenés à la plate-forme sud pour être conditionnés avant leur expédition finale.

Structures internes

La qualité du massif rocheux permet de mettre en place un revêtement définitif de faible épaisseur, voire par endroit de laisser la roche à nu. Il est constitué :

- ◆ d'une première couche en béton projeté d'environ 25 mm d'épaisseur ;
- ◆ pose d'une membrane d'étanchéité dans les zones humides uniquement ;
- ◆ de la couche finale de revêtement, d'une épaisseur variable de 50 à 100 mm.

Le revêtement de la voûte est suivi de la réalisation du remblai drainé du radier, dans lequel 42 km de fourreaux PVC sont intégrés, le tout recouvert d'une dalle béton permettant la circulation des véhicules de maintenance.

Pour les phases de réalisation des structures internes, les installations sur la plate-forme en mer sont modifiées pour intégrer une centrale à béton et les trains de fourniture et pose du béton projeté à l'aide de robots.

Equipements et travaux extérieurs

Une fois les structures internes du tunnel finalisées, les équipes poseront tous les équipements mécaniques et électriques situés principalement au portail nord où se situe entre autres la ventilation du tunnel pour son exploitation.

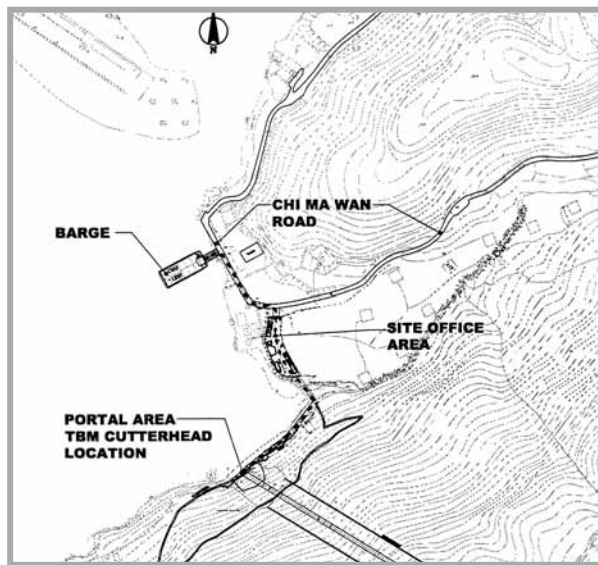


Figure 5
Principe de démontage de la tête de coupe et de la motorisation par le portail nord du tunnel de Chi Ma Wan

Technique for dismantling the cutting head and engine via the northern portal of the Chi Ma Wan tunnel



Photo 7
Barge de chargement du tunnelier proche du portail nord du tunnel de Chi Ma Wan

TBM loading barge near the northern portal of the Chi Ma Wan tunnel



Photo 8
Situation du tunnel de Kwai Chung

Location of the Kwai Chung tunnel

L'aménagement définitif des portails et la démolition de la plate-forme gagnée sur la mer marqueront la fin des travaux.

■ TUNNEL DE KWAI CHUNG

Présentation

La ville de "Kwai Chung" située dans le sud-ouest des "Nouveaux Territoires" de Hong Kong est très urbanisée. La modernisation des lignes électriques alimentant la sous-station au cœur de la ville, devait donc devenir souterraine sur 1,1 km.

Le tunnel démarre au pied des pylônes des lignes aériennes, situés à flanc de montagne, et débouche directement dans la sous-station électrique (photo 8).

Son tracé, situé sous les routes existantes pour des raisons administratives, comporte huit virages à angle droit (ou similaire) et permet d'alimenter deux puits intermédiaires. Il est enterré à une pro-

Figure 6
Coupe géologique
du tunnel de Kwai Chung
Geological cross section
of the Kwai Chung tunnel



Photo 9
Installation de chantier
principale au puits D
de Kwai Chung
Main construction plant
at Kwai Chung shaft D



Photo 10
Installation de chantier
à la sous-station
de Kwai Chung
Construction plant
at Kwai Chung
sub-station



Géologie

Le tunnel est implanté entièrement dans un massif rocheux granitique dur à très dur, légèrement décomposé et moyennement fracturé (figure 6). Quelques dykes traversent le tracé mais sans affectation majeure sur l'excavation, sauf une faille composée d'intrusions basaltiques très fracturées sur 30 m du tunnel (Q Barton < 0,1). Ce massif rocheux de bonne qualité est presque affleurant et seulement les 10 derniers mètres supérieurs des puits traversent des remblais et une zone granitique de transition complètement décomposée. Les soutènements mis en œuvre pendant le creusement du tunnel se sont limités à un boulonnage ponctuel. Pour des raisons de sécurité un béton projeté de 40 mm est appliqué aux virages, croisements du tunnel et à l'intérieur des puits.

Etudes

L'organisation pour les études d'optimisation est identique à celle du projet de Chi Ma Wan. Une des principales adaptations réalisées est la modification de la pente maximale du tunnel ramenée de 16 % à 8 %. Ove Arup and Partners HK Ltd réalise les études d'exécution.

Installations

L'installation de chantier principale est située au puits D intermédiaire, et occupe temporairement un parking privé (photo 9). Elle se limite à 1 600 m² et nécessite une organisation journalière très stricte pour approvisionner les fournitures et évacuer les déblais d'excavation, sans créer de ralentissement sur la voie publique et de rupture dans la rotation des camions. C'est de cette zone que 80 % du tunnel est excavé avec deux attaques en parallèle. La seconde installation au puits B permet la réalisation de l'extrémité sud du tunnel, côté sous-station électrique. Elle se situe dans une ruelle, condamnée pendant les travaux, obstruée complètement par le puits et coincée entre un bâtiment et une école primaire. La situation des deux autres installations est encore moins enviable, car en cul de sac à angle droit derrière une caserne de pompiers et dans un talus blindé pour l'une, et dans la

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Kwai Chung

Tunnel

- Longueur : 1 059 m
- Excavation : 18 000 m³
- Bétons : 2 600 m³

Puits

- Hauteurs : 36 m, 41 m, 43 m et 42 m
- Sections : 38 m à 86 m²
- Excavation : 7 800 m³
- Béton : 3 100 m³



fondeur moyenne de 40 m et sa pente atteint 8 % par endroit (figure 6).

Le lot de Kwai Chung est composé :

- ◆ du tunnel d'une section excavée de 16 m², réalisé en traditionnel à l'explosif ;
- ◆ de quatre puits d'accès de hauteur comprise entre 36 m et 42 m et de section de 38 à 86 m² ;
- ◆ de deux baies de jonction des câbles électriques, de 27 m² sur 30 m ;
- ◆ des revêtements intérieurs et des équipements électriques et mécaniques.

L'environnement urbain très dense nécessite de prévoir l'organisation du chantier très en amont pour prendre en compte et maîtriser les contraintes de bruit, vibration, poussières et limitation des emprises chantier.

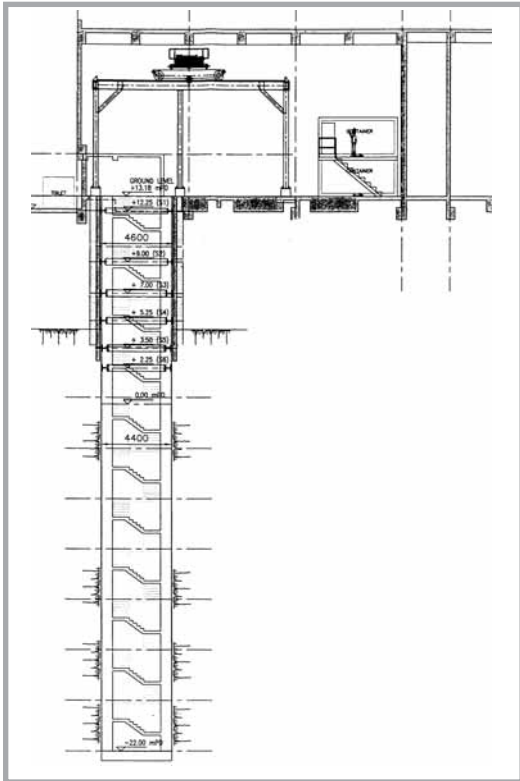


Figure 7
Plan d'un puits de Kwai Chung
Drawing of a Kwai Chung shaft



Photo 11
Puits excavé
de Kwai Chung
Excavated
Kwai Chung shaft



Photo 12
Tunnel excavé
de Kwai Chung
Excavated
Kwai Chung tunnel

CALENDRIER D'EXÉCUTION ET DÉLAIS

Kwai Chung

- Ordre de service : 18 avril 2002
- Mise à disposition des aires d'installation : 1^{er} décembre 2002
- Installations de chantiers et travaux préparatoires : 1 mois et 6 mois pour le puits C situé dans les talus blindés
- Blindage et excavation des puits :
 - 7 mois pour le puits provisoire D
 - 12 à 14 mois pour les puits définitifs
- Excavation des tunnels d'août 2003 à mai 2004
- Réalisation du revêtement et du voile central du tunnel de mars 2004 à novembre 2004
- Bétonnage des puits et structures internes de juin 2004 à février 2005
- Equipements des tunnels et puits : 5 mois
- Livraison du chantier : 4 mai 2005

sous-station électrique en exploitation pour l'autre (photo 10). Ces implantations très particulières ont nécessité la conception et la fabrication de portiques de manutention spécifiques au projet.

Excavation des puits

Les puits sont excavés avec trois méthodes différentes (figure 7 et photo 11) :

- ◆ la partie supérieure dans les remblais est déblayée à la pelle entre des palplanches ou des tubes métalliques sécants butonnés à l'avancement ;
- ◆ à l'éclateur mécanique, pour la partie rocheuse supérieure ;
- ◆ à l'explosif, à partir du niveau autorisé par le "Mines Division".

Les cadences moyennes obtenues sont d'environ 10 m³/jour à l'éclateur et 30 m³/jour à l'explosif.

Excavation du tunnel

L'excavation principale du tunnel (photo 12) depuis le puits provisoire D est réalisée sur deux fronts en

Photo 13
Coffrage et bétonnage
de la voûte du tunnel
de Kwai Chung

*Shuttering and concreting
of the Kwai Chung tunnel
roof arch*



Photo 14
Coffrage du voile
central du tunnel
de Kwai Chung

*Shuttering
for the central shell
of Kwai Chung tunnel*



▶ parallèle avec pianotage du matériel d'une attaque à l'autre. Les déblais sont évacués au chargeur et stockés provisoirement pour libérer au plus vite les fronts. Ils sont ensuite repris et évacués au portique à l'aide de bennes.

Les matériels mis en œuvre dans la section de 16 m² sont :

- ◆ un jumbo à un bras ;
- ◆ une nacelle élévatrice pour le chargement des explosifs ;
- ◆ une pelle mécanique 6 t pour la purge ;
- ◆ un robot de projection du béton ;
- ◆ un ventilateur de 25 kW ;
- ◆ des marteaux pousseurs.

L'organisation des équipes est à deux postes de 10 heures par jour et 6 jours par semaine. Les cycles d'excavation sont adaptés à la géologie pour permettre un tir par jour, planifié à 13 heures avec les autorités locales. Des mesures vibratoires sont

réalisées pendant la durée du chantier afin de prouver le respect des seuils limites et les plans de chargement sont quotidiennement modifiés pour optimiser les avancements en fonction de la distance des ouvrages existants.

Les rendements obtenus sont de 66 m par mois par attaque, avec une moyenne globale de 50 m par mois par attaque y compris mises en cadence, passages particuliers des courbes, des virages à 90° et des jonctions entre puits et tunnels.

Revêtement, structures internes et équipements

Les puits sont revêtus en périphérie d'une étanchéité et d'un voile en béton armé de 65 cm d'épaisseur sur toute la hauteur, et équipés d'escaliers et de planchers en béton armé espacés d'environ 3,5 m. Les tunnels reçoivent un revêtement en béton coffré de 20 cm pour les zones courantes (photo 13) et en béton projeté pour les zones particulières telles que virages, baies élargies...

Les opérations se déroulent dans l'ordre suivant :

- ◆ bétonnage des amorces des piédroits sur une hauteur d'environ 70 cm contre l'excavation ;
- ◆ pose du drain longitudinal et de la couche drainante ;
- ◆ bétonnage du radier de 30 cm ;
- ◆ accrochage du géotextile et de l'étanchéité sur le béton projeté support ;
- ◆ bétonnage de la voûte par plot de 8 m tous les deux jours ;
- ◆ réalisation du voile central (photo 14).

L'approvisionnement du béton à fort slump (200 mm environ) passe dans les puits par des tubes à manchettes pour être freiné avant d'être pompé en tunnel.



Photo 15
Equipements du tunnel de Kwai Chung
Kwai Chung tunnel equipment

Pour finir les travaux se poursuivent par la pose de tous les équipements en tunnel (photo 15).

■ CONCLUSION

A ce jour, le projet de Kwai Chung est livré et le tunnel de Chi Ma Wan démarre les derniers travaux avec le radier et les équipements.

La satisfaction du client mesurée avec les indicateurs clefs atteint 96 %. Cela montre que l'organisation et l'anticipation des moyens mis en œuvre par la direction du projet sont des éléments fondamentaux pour maîtriser les contraintes environnementales fortes.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Client

CLP Power Hong Kong Limited

Groupement d'entreprises

Dragages Hong Kong (filiale de Bouygues TP)
 - Bouygues Travaux Publics

Bureaux d'études

- Mott Connell Ltd (Chi Ma Wan Tunnel)
- Ove Arup and Partners HK Ltd (Kwai Chung Tunnel)

Bureaux de contrôle

- Maunsell Geotechnical Services Ltd (travaux de génie civil)
- Parsons Brinckerhoff (Asia) Ltd (équipements électriques et mécaniques)

ABSTRACT

CLP tunnels in Hong Kong. Design and construction of small-cross-section tunnels in granite

E. Wong, P. Ip, A. Raine, Fr. Vallon

Working for the modernization of the electrical supply network of Hong-Kong, Bouygues Public Works, in partnership with its subsidiary company Dragages Hong-Kong, carries out the design and construction of more than 5 km of tunnels located in 4 different sites. Due to their geographical location, these projects are subjected to stringent environmental constraints, to the local regulation and certain special conditions of the contract. The article describes the two principal tunnels excavated in granite and their method of construction in such constraining environment.

RESUMEN ESPAÑOL

Túneles de CLP en Hong Kong. Diseño y construcción de túneles de sección reducida en el granito

E. Wong. P. Ip, A. Raine y Fr. Vallon

Actuando en el marco de la modernización de la red eléctrica de Hong Kong, Bouygues Travaux Publics, en asociación con su filial Dragages Hong Kong, lleva a cabo la ejecución del diseño y construcción de más de 5 km de túneles distribuidos en 4 emplazamientos distintos. Estos proyectos quedan sometidos a diversos imperativos medioambientales considerables, relacionados con su situación geográfica, la normativa local y ciertas condiciones originales del contrato. En el presente artículo se describen los dos principales túneles realizados en el granito y su modo de construcción en este entorno particularmente sensible.

Gestion des données : la appliquée aux stockages

Le stockage profond est l'une des trois voies explorées par les pouvoirs publics pour le devenir des déchets radioactifs. Un laboratoire souterrain est construit sur la commune de Bure (Meuse) pour vérifier *in situ* les capacités de confinement dans une argilite située à 500 m de profondeur. Des expérimentations sont menées en parallèle dans des formations géologiques analogues au Mont Terri en Suisse. Les études scientifiques réalisées sur ces deux sites génèrent un flux important d'informations traitées par le logiciel Geoscope Web® développé par Sol Data.

■ LES DÉCHETS RADIOACTIFS ET LEUR STOCKAGE

La radioactivité est un phénomène naturel qui décroît avec le temps. Cette décroissance radioactive est plus ou moins rapide selon les éléments considérés et permet de distinguer deux catégories de déchets radioactifs : les déchets dits "à vie courte" qui sont ceux qui perdent la moitié de leur radioactivité en moins de trente ans, et les autres, qui sont dits "à vie longue". Un autre critère est utilisé pour classer les déchets et définir des solutions de gestion appropriées : leur activité, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'ils dégagent.

En France, plus de 90 % des déchets radioactifs produits sont des déchets à faible ou à très faible activité et à vie courte. Ce sont des matériels de laboratoires, des instruments médicaux, des gants,

des chiffons, etc. Ces déchets sont stockés en surface dans trois sites gérés par l'ANDRA : le centre Manche à Beaumont Hague, et les centres de stockage de l'Aube à Soulaines et Morvilliers.

Les 10 % restant sont des déchets radioactifs de haute activité ou à vie longue pouvant dépasser la centaine de milliers d'années. Ils sont pour l'essentiel constitués par les "cendres" de la combustion nucléaire. Leur gestion à long terme est encadrée par la loi n° 91-1381 dite "loi Bataille" votée le 30 décembre 1991. Celle-ci prévoit de mener des recherches pendant 15 ans selon trois voies :

1. la transmutation-séparation, technique qui vise à isoler les radionucléides à vie longue présents dans les déchets nucléaires, puis à les transformer en éléments stables et à vie courte ;
2. l'entreposage en surface et en sub-surface ;
3. le stockage géologique profond.

L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RADioactifs (ANDRA) est en charge de cette troisième voie et elle effectue des recherches sur différents types de terrain.

C'est dans ce cadre que prennent place les expériences de Bure, site à cheval sur les départements de la Meuse et de la Haute-Marne en France, et du Mont Terri en Suisse.

■ LE LABORATOIRE DE BURE

Depuis 1994, les scientifiques de l'ANDRA mènent des investigations sur la commune de Bure, à l'Est du Bassin Parisien, afin d'étudier les caractéristiques géologiques d'une couche argileuse continue de 130 m d'épaisseur située entre 420 m et

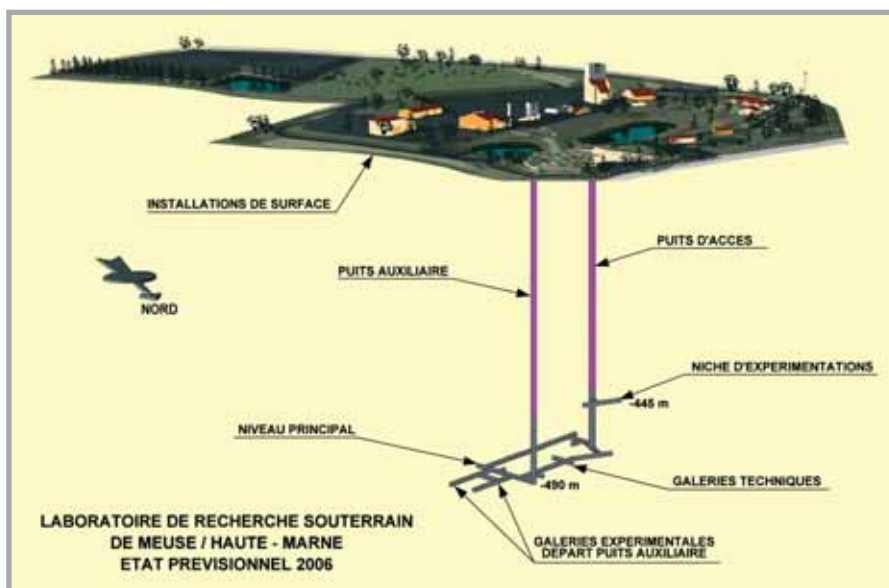


Figure 1
Vue générale du laboratoire de recherche de Meuse/Haute-Marne à Bure

General view of the Meuse/Haute-Marne research laboratory in Bure

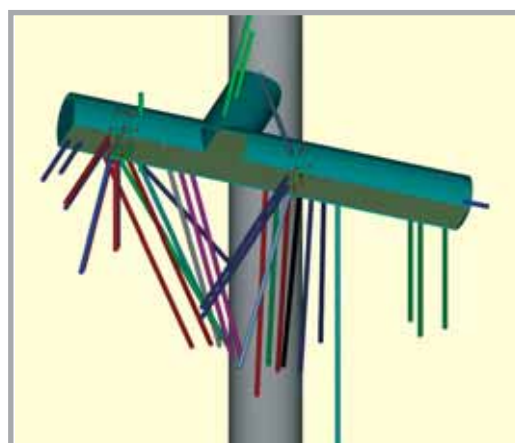


Figure 2
Vue 3D des forages de la galerie expérimentale à -445 m
3D view of boring of the experimental gallery at -445 m

Photo 1
Galerie expérimentale à -445 m
Experimental gallery at -445 m



technologie Sol Data radioactifs

550 m de profondeur. Ils cherchent à connaître la capacité de la roche à confiner la radioactivité, et doivent déterminer si un stockage souterrain réversible sera possible et sûr à long terme.

Pour conduire ces études, le creusement d'un laboratoire souterrain a débuté en 2001. Ce laboratoire se compose de plusieurs installations de surface, de deux puits de 500 m, d'une galerie d'expérimentation à 445 m de profondeur et d'un réseau de galeries d'expérimentation dans une couche du Callovo-Oxfordien âgée de 150 millions d'années régnant à 490 m de profondeur (figure 1).

Cinq grandes séries d'expériences sont réalisées dans le laboratoire. Il s'agit de vérifier l'imperméabilité de la roche, son aptitude au creusement et sa capacité à retarder la migration des éléments radioactifs et à les retenir.

Plusieurs centaines de capteurs sont et seront installées pour ausculter la couche géologique, en temps réel pendant les expérimentations.

Depuis fin 2004, la niche expérimentale de 40 m de long est truffée de capteurs pour mesurer la déformation induite par le percement des quelques dizaines de mètres restants du puits principal et des futures galeries horizontales qui seront excavées courant 2005 (figure 2 et photo 1).

Début et mi-2005, les premières expériences seront mises en place dans les galeries de fond.

En parallèle, des essais depuis des forages dirigés profonds sont réalisés depuis la surface.

LE LABORATOIRE DU MONT TERRI

Le laboratoire souterrain du Mont Terri est situé dans le Nord-Ouest de la Suisse, dans le canton du Jura (figures 3 et 4). Il est réalisé sous la direction de l'Office Fédéral Suisse des Eaux et de la Géologie. Son objectif est de vérifier la faisabilité technique et la sûreté des stockages en roche argileuse pour les déchets radioactifs. Aucun dépôt n'y est prévu.

Le laboratoire fédère une large communauté scientifique internationale qui étudie le stockage de déchets radioactifs dans les argiles. Mettant à profit la galerie de reconnaissance d'un tunnel de l'autoroute traversant le Jura de Belfort à Berne, des chercheurs français, suisses, allemands, japonais, belges et espagnols se sont associés en 1996 dans le "projet Mont Terri". Onze partenaires institutionnels y financent des expérimentations in situ, c'est-à-dire au cœur de la roche. Trente-huit

universités et instituts de recherche sont liés à ce laboratoire souterrain.

Dès l'origine du projet, l'ANDRA s'est impliquée dans l'ensemble des expérimentations réalisées au Mont Terri, et sa participation s'y est encore renforcée depuis 2002. Comme la nature de la roche du Mont Terri et de celle de Bure sont similaires, l'acquisition de données au Mont Terri permet de transposer certains résultats, de préciser la compréhension des phénomènes modélisés par les chercheurs, et aussi de vérifier si les mesures pratiquées sur des échantillons décimétriques sont représentatives de ce qui se passe à l'échelle d'une galerie.

En apportant des données complémentaires à celles obtenues dans le laboratoire de Bure, les expérimentations du "projet Mont Terri" viendront enrichir le dossier sur la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue dans l'ar-

Philippe Tabani

RESPONSABLE SAGD
ANDRA



Martin Beth

DIRECTEUR
DES OPÉRATIONS
Sol Data



Jacques Delay

RESPONSABLE
SCIENTIFIQUE
ANDRA



Paul Da Fonseca

RESPONSABLE
DU CHANTIER
Sol Data

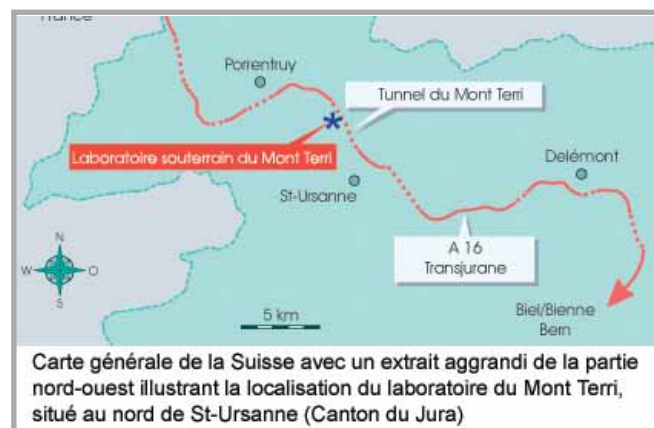


Figure 3
Localisation
du laboratoire
de recherche
du Mont Terri

*Location of the Mont Terri
research laboratory*

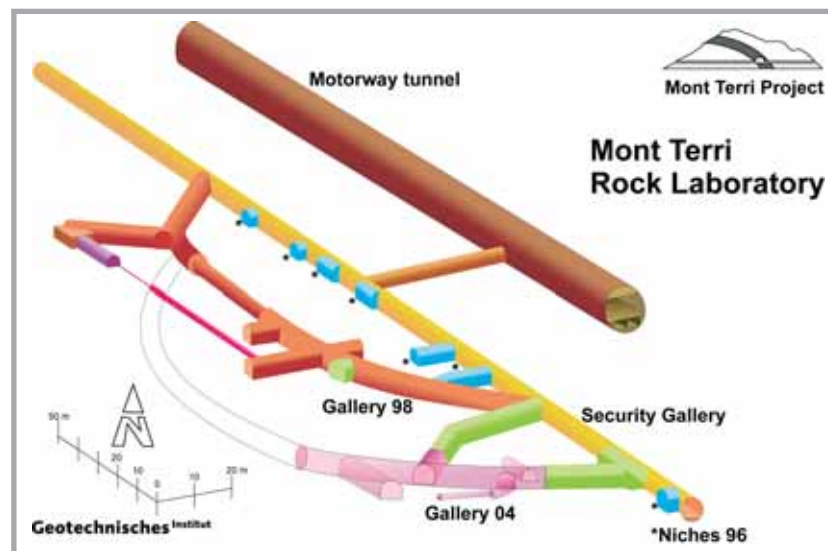


Figure 4
Vue 3D
des galeries
du laboratoire
de recherche
du Mont Terri

*3D view
of the galleries
of the Mont Terri
research
laboratory*

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs)

Assistance au maître d'ouvrage
Democritus

Maître d'œuvre scientifique
Antea

Maître d'œuvre installations de surface
Sodeteg

Maître d'œuvre des expérimentations scientifiques fond
ANDRA

*Groupement concepteur-construc-
teur*

GFE (Groupement Fond Est) : Groupement Bouygues TP – Vinci Construction – CdF Ingénierie – Campenon Bernard TP

Sous-traitant ANDRA pour le SAGD
Sol Data. Conception, mise en œuvre et maintenance du système d'acquisition et de gestion des données, dans le but de pouvoir disposer, en temps réel et sur un système unique, de toutes les données en cours d'acquisition dans le laboratoire, d'assurer la traçabilité de toutes les informations enregistrées et d'homogénéiser tous les modes de vérification et de validation des données

Sous-traitants ANDRA prestataires expérimentations

Plusieurs entreprises spécialisées installent des capteurs reliés sur les systèmes d'acquisition de Sol Data. On peut citer : Solexpert AG – Sceaurooute – Ineris – GRS – Gextex – Métromesures – DBE – IDFOS, etc.

Autres intervenants scientifiques, qui utilisent les données du SAGD et/ou réalisent ou analysent des expériences

CEA – BGR – Colenco – Nagra, etc.



Photo 2
Photo d'un coffret d'acquisition de la galerie expérimentale de Bure à - 445 m

Photo of a data acquisition module for the Bure experimental gallery at - 445 m



gile, qui sera remis au gouvernement français fin 2005 dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991.

■ L'ACQUISITION ET LE SUIVI DES DONNÉES

La conception du système

Dès le début des phases de conception avancées du laboratoire, l'ANDRA a considéré comme crucial le sujet de l'acquisition, du stockage et de la présentation des résultats des multiples expériences qui allaient être réalisées. Des masses de données allaient être récoltées par de multiples spécialistes, chercheurs et prestataires extérieurs, et il était très important :

- ◆ de contrôler les méthodes d'acquisition de ces données en empêchant que des erreurs humaines ou des défaillances techniques ne conduisent à perdre des données ou à acquérir des données erronées ;

- ◆ de contrôler le stockage sur le long terme de toutes les données, en un lieu unique et sous une forme unique, étant observé que ces conditions, souvent sous-estimées, sont vitales ;

- ◆ de permettre la diffusion et le libre accès aux données aux multiples chercheurs de l'ANDRA et aux prestataires, d'une manière fluide, unique et identique quelle que soit l'origine des données ;

- ◆ d'aider à la communication externe, avec une présentation conviviale et aisément compréhensible des résultats enregistrés.

Des spécifications détaillées étaient préparées pour un SAGD (Système d'acquisition et de gestion des données) adapté à ces besoins. D'autre part, les tâches d'acquisition des données en général (depuis la sortie des capteurs) étaient également incluses dans l'appel d'offres.

Les spécifications de l'appel d'offres définissaient le SAGD adapté à ces besoins. D'autre part, les tâches d'acquisition des données en général, et ce depuis la sortie des capteurs, étaient également précisées.

L'entreprise française Sol Data s'est trouvée adjudicataire du marché, en considération notamment de sa grande expérience dans la réalisation de chantiers d'instrumentation en conditions difficiles.

Le SAGD de Sol Data, le Geoscope Web[®], est un produit rodé, utilisé et amélioré depuis de nombreuses années sur les chantiers d'instrumentation entrepris par les sociétés du groupe Sol Data en Europe ou en Asie, qui sont pour l'essentiel des chantiers de génie civil. Il suffisait de quelques développements spécifiques pour compléter les possibilités de ce SAGD éprouvé afin qu'il réponde aux demandes de l'ANDRA, et soit prêt à entrer en action.

Le système à ce jour

Le SAGD permet aux scientifiques de suivre en temps réel, depuis leur bureau, l'évolution des différents paramètres. Les informations sont acquises, stockées et gérées par le logiciel Geoscope Web[®] installé sur le réseau informatique de Bure.

A Bure, ce sont des liaisons par fibre optique qui transportent les données des expériences, qu'elles aient pour origine le fond du puits ou la surface, vers la salle de contrôle où se trouvent les serveurs. Une liaison Internet à haut débit entre le site du Mont Terri et celui de Bure permet de centraliser toutes les données dans les ordinateurs du laboratoire français.

Des boîtiers d'acquisition de type "chantier" sont préparés, équipés et installés dans les zones d'expérimentations par les équipes Sol Data, prêts à recevoir les branchements des capteurs des différents prestataires (photo 2).

Les utilisateurs peuvent visualiser les résultats soit depuis les bureaux de l'ANDRA, soit depuis la niche et les galeries en fond, soit depuis n'importe quel poste informatique connecté à Internet (figure 5). Le logiciel est pourvu d'une capacité de stockage de plusieurs millions de données. Les utilisateurs bénéficient d'une interface graphique conviviale qui leur permet d'accéder aux informations enregistrées depuis le premier jour des expérimentations et de les visualiser. Ceci leur permet de réaliser des modélisations très poussées.

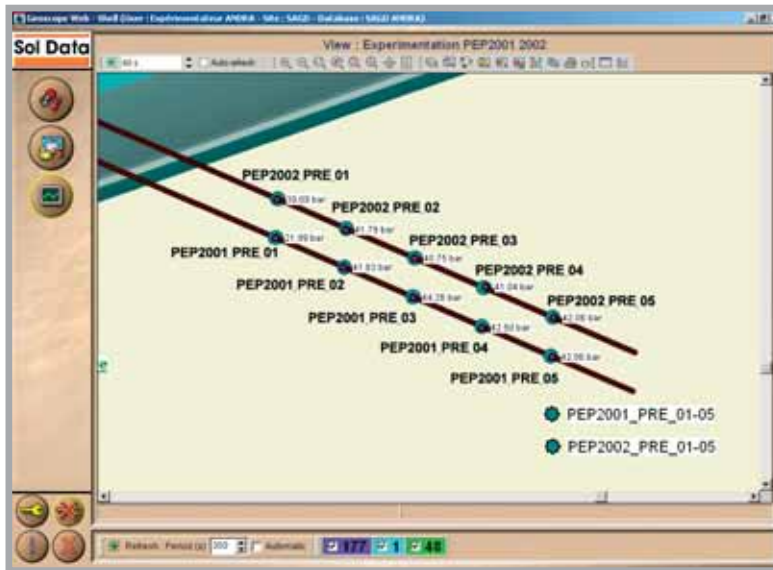


Figure 5
 Visualisation des capteurs d'une expérimentation en cours avec le logiciel Geoscope Web®
 Viewing the sensors for an experiment underway with the Geoscope Web® software

CONCLUSION

Les sites de Bure et du Mont Terri ont été équipés pour l'étude des possibilités de stockage profond des déchets radioactifs.

Un Système d'acquisition et de gestion des données (SAGD) centralisé et performant, le Geoscope Web®, permet aux chercheurs de faire le meilleur usage des nombreuses données collectées.

Plusieurs dizaines de chercheurs travaillent aujourd'hui sur les informations disponibles et doivent soumettre d'ici quelques mois le fruit de leur travail au gouvernement français.

C'est en 2006 que le parlement et le gouvernement doivent évaluer les résultats obtenus dans les trois voies de recherches lancées en 1991, pour décider éventuellement de poursuivre les études sur le stockage.

ABSTRACT

Data management : the Sol Data technology applied to radioactive storage units

Ph. Tabani, M. Beth, J. Delay, P. Da Fonseca

Deep storage is one of the three methods being explored by the authorities for the future disposal of radioactive wastes. An underground laboratory is being built in the district of Bure (Meuse region) to verify in situ the containment capabilities in an argillite located at a depth of 500 m. Experiments are being carried out in parallel in similar geological formations at Mont Terri in Switzerland. The scientific research carried out at these two locations generates a large flow of information processed by the Geoscope Web® software developed by Sol Data.

RESUMEN ESPAÑOL

Gestión de datos : la tecnología Sol Data aplicada a los almacenamientos radioactivos

Ph. Tabani, M. Beth, J. Delay y P. Da Fonseca

El almacenamiento profundo constituye una de las tres vías exploradas por parte de los poderes públicos para el porvenir de los residuos radioactivos. Se ha construido un laboratorio subterráneo en el municipio de Bure (Meuse) para comprobar in situ las capacidades de confinamiento en una capa arcillosa ubicada a 50 metros de profundidad. Fueron llevadas a cabo diversas experimentaciones en paralelo en las formaciones geológicas análogas al Monte Terri en Suiza. Los estudios científicos realizados en estos dos sitios generan un importante flujo de información procesado por el software Geoscope Web® desarrollado por Sol Data.

Le tunnel des Monts Réhabilitation de l'ouvrage

Le tunnel des Monts est situé sur la RN 201 et fait partie de la voie rapide urbaine (VRU) qui contourne Chambéry. Cette VRU, d'une longueur de 14 km, assure la continuité du réseau autoroutier (A43 : Lyon-Italie par le Fréjus et A41 Grenoble-Genève) depuis sa mise en service fin 1981, exploitée d'abord avec deux voies par sens, puis avec trois voies par sens depuis juillet 1985.

Le tunnel des Monts est constitué de deux tubes unidirectionnels parallèles, creusés à 20 m l'un de l'autre (distance minimum entre piédroits et 30 m entre axes) et reliés par trois galeries de communications. Il permet, en site urbain, le franchissement du massif calcaire constituant la colline des Monts qui surplombe à l'Est l'agglomération chambérienne, sous une couverture maximale de 70 m.

Le tube nord (sens Italie/Albertville/Grenoble →Lyon) a une longueur de 889 m et le tube sud (Lyon→Grenoble/Albertville/Italie) 870 m (figures 1 et 2).

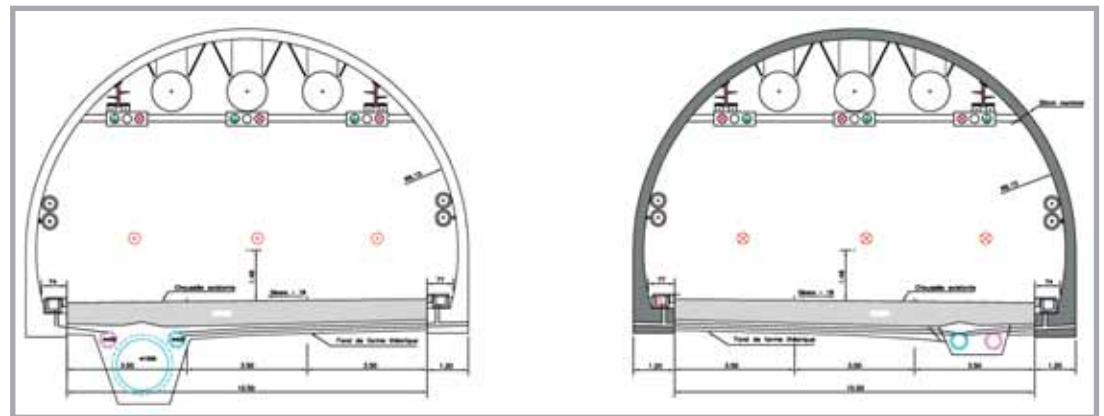


Figure 1
Coupes des tubes nord et sud
Cross sections of the north and south tubes

■ DESCRIPTION DES TRAVAUX

Etat des lieux

Après plus de 20 ans d'exploitation, les équipements du tunnel des Monts présentent un certain nombre de dysfonctionnements dus, pour la majorité d'entre eux, à un vieillissement accéléré des installations, notamment pour la partie située dans l'ouvrage où l'ambiance s'est révélée particulièrement agressive.

L'absence d'étanchéité entraîne des infiltrations des eaux du massif au travers de la fissuration du béton de la voûte. Ces venues d'eau qui peuvent être importantes lors des périodes de précipitation

ruissellent sur les équipements, éclairage et ventilation notamment, provoquant une corrosion importante de leurs parties métalliques et une dégradation rapide des organes électromécaniques. Par temps froid, du verglas se forme sur la chaussée, accompagné de stalactites en voûte et de colonnes de glace sur les piédroits. Il en résulte des contraintes d'exploitation importantes, la subdivision territoriale de la DDE basée à Chambéry devant intervenir pratiquement chaque nuit quand la température est négative pour casser les stalactites envahissant les chemins de câbles et les appareils d'éclairage et empêchant même l'ouverture des niches de sécurité.

La remise en état des équipements nécessite, suivant leur nature et les constatations faites, soit des réparations, soit des mises à niveaux, soit un remplacement pur et simple.

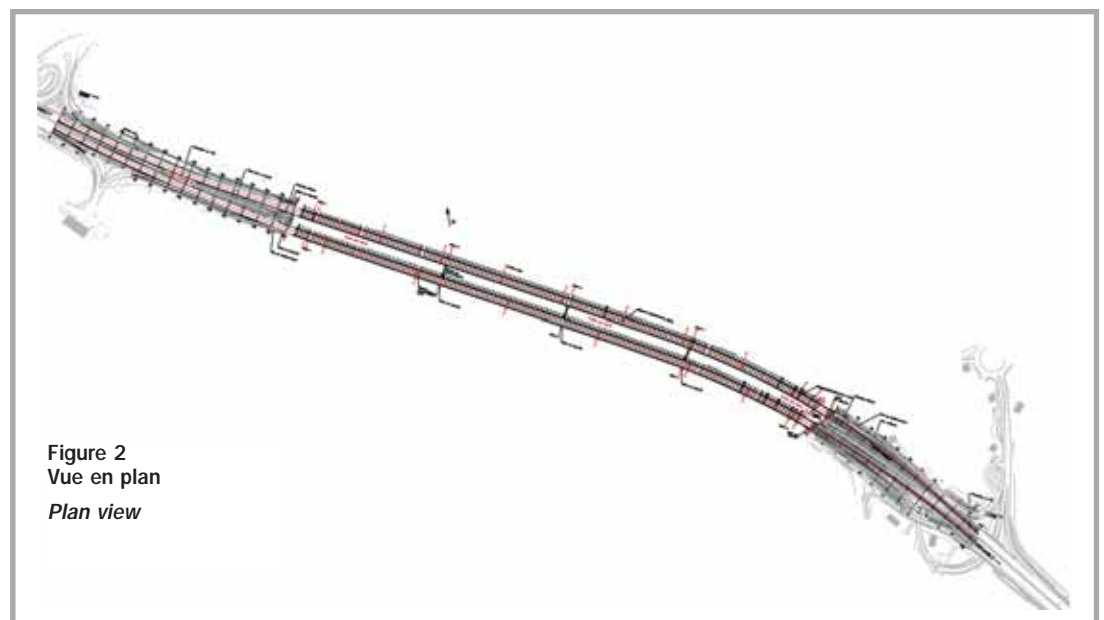


Figure 2
Vue en plan
Plan view

Le marché de travaux

Les prestations d'un montant de 33 M€ concernent :

- ◆ la réalisation d'une étanchéité totale de l'ouvrage par la mise en place d'une géomembrane protégée par un nouveau revêtement en béton coffré mince. Afin de conserver le gabarit actuel dans l'ouvrage, ces travaux s'accompagnent d'un abaissement du niveau de la chaussée ;

- ◆ une mise en conformité avec la circulaire 2000-63 pour tout ce qui concerne les équipements (ventilation, éclairage, capteurs de pollution, signalétique, sécurisation des réseaux électriques, mise en place d'une détection automatique d'incendie, mise en place d'un réseau d'assainissement relié à un nouveau bassin de 200 m³, mise en place de nouveaux équipements de contrôle et de commande des installations).

Elles font l'objet d'un marché à tranches conformément aux dispositions de l'article 72 du Code des Marchés publics :

- ◆ tranche ferme : travaux préparatoires et tube nord ;
- ◆ tranche conditionnelle 1 : tube sud (figure 3).

Les délais de réalisation

Ces travaux sont à exécuter sur une période de deux ans et trois mois couvrant deux tranches de travaux comportant elles-mêmes différents délais distincts. Le délai réservé aux interventions du génie civil dans chaque tube est limité à huit mois et demi et se déroulent exclusivement de nuit.

- ◆ notification de la tranche ferme : 29 septembre 2004 ;
- ◆ ordre de service de démarrage des travaux : 25 octobre 2004 délai 14,5 mois ;
- ◆ ordre de service des travaux en tube nord : 4 avril 2005 délai 8,5 mois.

Les particularités du chantier

La problématique trafic

La voie rapide urbaine de Chambéry a vu son trafic moyen journalier annuel passer de 18 000 véhicules lors de sa mise en service en 1982 à 83 000 véhicules en 2004. Cette croissance soutenue tient au fait que cet axe comprenant trois voies de circulation dans chaque sens constitue l'artère unique de l'agglomération permettant, par l'intermédiaire de points d'échange rapprochés, une bonne migration entre les différents pôles d'habitat et d'activité.

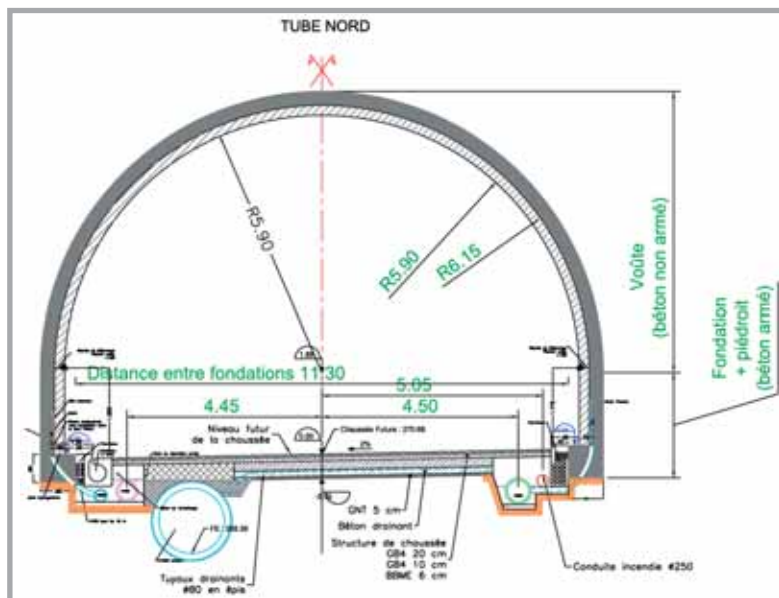


Figure 3
Projet du tube nord
North tube project



Entrée du tube sud en tête ouest
South tube entrance at the western portal



Tube nord :
abaissement de la chaussée vole rapide en avril 2005
North tube : lowering of the fast lane pavement in April 2005



Tube nord : démolition des caniveaux côté voie rapide

North tube : demolition of the fast lane side gutters

► Preuve en est la composition du trafic dont trois déplacements sur quatre correspondent à des échanges locaux.

Le trafic d'une journée d'une semaine travaillée est très sensiblement analogue d'un sens à l'autre. Le trafic nocturne est très modeste, moins de 1 000 véhicules dans une heure entre 21 h 30 et 6 h 30. A partir de 6 h 30, la croissance est brutale : la pointe de trafic se situe entre 7 h 45 et 8 h 00, avec des valeurs du quart d'heure atteignant 1 500 véhicules. Entre 9 h 30 et 16 h 30, le trafic oscille entre 2 700 et 3 300 v/h avant une pointe de fin d'après-midi et de début de soirée, à savoir entre 3 500 et 4 500 v/h entre 16 h 30 et 19 h 30.

La structure du trafic est très différenciée selon l'heure de la journée, selon la saison considérée et enfin selon la journée, ouvrée ou de week-end. Le diagnostic du réseau routier de l'agglomération a très rapidement fait ressortir l'impossibilité de compter sur le report partiel du trafic de la VRU sur le réseau déjà fortement chargé aux heures de pointe du matin et de la soirée.

Dans ces conditions, le chantier dans un des deux tubes ne peut se dérouler que sur les heures de nuit au cours desquelles le trafic s'écoule sur deux voies (une par sens) du tube qui n'est pas en travaux.

Maintien du niveau de sécurité

L'exécution des travaux visés s'accompagne des dispositions particulières liées au contexte d'un environnement d'exploitation opérationnel (voiries sous circulation en extérieur, PC en service proche de l'ouvrage en cas de problème).

Etant donné les travaux à réaliser et les conditions de circulation, le principe de travaux de nuit sous restriction de voie ou fermeture par balisages a été retenu comme hypothèse systématique.

Le tube hors travaux dispose de tous ses équipements et de leur système de gestion quel que soit le phasage de réhabilitation du tube en travaux.

Circulation pendant les travaux

Les démolitions engagées et l'installation du matériel de chantier n'autorisent au mieux que la restitution de deux voies de circulation dans le tube en travaux. De plus, lors de phases particulières de travaux, en particulier le décaissement de la chaussée existante sur une profondeur de l'ordre de 80 cm, une seule voie est remise en circulation de jour dans le tube en travaux. Pour obtenir la seconde voie indispensable dans le sens considéré pour écouler au mieux le trafic de la VRU, une voie du tube opposé est utilisée à contresens. C'est en l'occurrence cette voie qui est également utilisée la nuit lorsque le tube en travaux est totalement fermé.

Le chantier a donc démarré avec la mise en place d'un séparateur de type GBA béton dans le tube sud. L'utilisation de cette voie à contresens dans le tube sud, de jour, est prévue sur une durée de trois mois environ en début de chantier. D'un point de vue sécurité, il s'agit là de la phase la plus critique du chantier.

Dans le tube en travaux, la voie remise en circulation de jour est, selon les étapes du chantier, située d'un côté ou de l'autre du tube (voie lente ou voie rapide).

Il est prévu de remettre de jour deux voies de circulation dans le tube en travaux. Cette configuration est en particulier utilisée tout au long des étapes de bétonnage de la voûte, les outils coffrants libérant le gabarit nécessaire au passage de ces deux voies.

Pour réussir à réhabiliter totalement un tube sur une période de huit mois et demi, le chantier pourra être actif six nuits par semaine. Chaque nuit, une période utile d'au moins huit heures consécutives de fermeture à la circulation est nécessaire. Les interventions quotidiennes, chaque soir et chaque matin, de basculement de la circulation sont confiées pendant toute la durée du chantier à une entreprise spécialisée. Cette entreprise a de plus une mission de surveillance et de maintenance de la signalisation mise en place (panneaux, cônes, balises, etc.). Elle intervient en liaison étroite avec le poste de contrôle du tunnel qui pilote les équipements dynamiques aux abords de l'ouvrage lors des basculements de circulation et qui assure une surveillance de l'ouvrage et de la VRU à ses abords 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.

Les choix techniques

Concernant le génie civil et les équipements, tous les travaux nécessaires à la réhabilitation de l'ouvrage ne peuvent être présentés ici. Seuls quelques points sont développés.

Pour le génie civil, l'une des fortes contraintes du

projet est liée à la limitation de l'abaissement possible du niveau de la chaussée, ceci pour deux raisons incontournables :

- ◆ l'existence du collecteur sous chaussée de diamètre 1 500 mm dans le tube nord, à maintenir intact pour assurer le passage du ruisseau ;
- ◆ le profil en long de la chaussée abaissée doit s'intégrer de façon harmonieuse dans le profil en long général de la VRU de façon à ne pas perturber l'assainissement de la chaussée et de manière à conserver un niveau de confort de conduite satisfaisant.

La hauteur libre minimale ne pouvant être diminuée, l'épaisseur maximale de la protection en béton de l'étanchéité est limitée à 25 cm. Cette valeur est bien inférieure à l'épaisseur habituelle d'un revêtement en béton coffré. Elle a nécessité une réflexion spécifique.

Au stade de l'avant-projet de réparation, une étude comparative de sept solutions de réparation compatibles avec les nombreuses contraintes du projet a permis au maître d'ouvrage d'opter pour l'une d'elles. Le choix s'est porté sur un chemisage mince en béton autoplaçant, protégeant une étanchéité traditionnelle identique à celle utilisée en tunnel neuf. Un phasage a été prévu pour que les travaux puissent éventuellement être interrompus en laissant le tunnel exploitable à la date impérative de sa réouverture totale à la circulation (15 décembre de chaque année de travaux).

■ LES MOYENS

Coffrage des piédroits

Après réalisation de l'abaissement de chaussée et réaménagement des VRD côtés voie lente et voie rapide, travaux réalisés par demi-chaussée, la réhabilitation de la voûte commencera par l'exécution de deux piédroits de hauteur 2 m.

Au préalable il aura été nécessaire de raboter l'anneau pour obtenir une épaisseur de piédroit de 25 cm, d'étancher par géomembrane translucide jusqu'à la même hauteur. Ces piédroits sont ferrillés sur toute la longueur du tunnel et des deux côtés. Ils sont réalisés par plots de 12,50 m à l'aide d'un coffrage outil. La cadence de réalisation a été fixée à 50 m par nuit. Le béton autoplaçant est mis en œuvre à la pompe mobile depuis une pipe d'injection située à un mètre du sol en milieu du coffrage. Les masques d'about sont métalliques, l'étanchéité est assurée par des joints néoprène (figure 4).

Coffrage de la voûte

Descriptif des procédures d'exécution

Pour respecter le délai de réalisation du chantier, l'entreprise a créé deux outils coffrage tunnel spé-

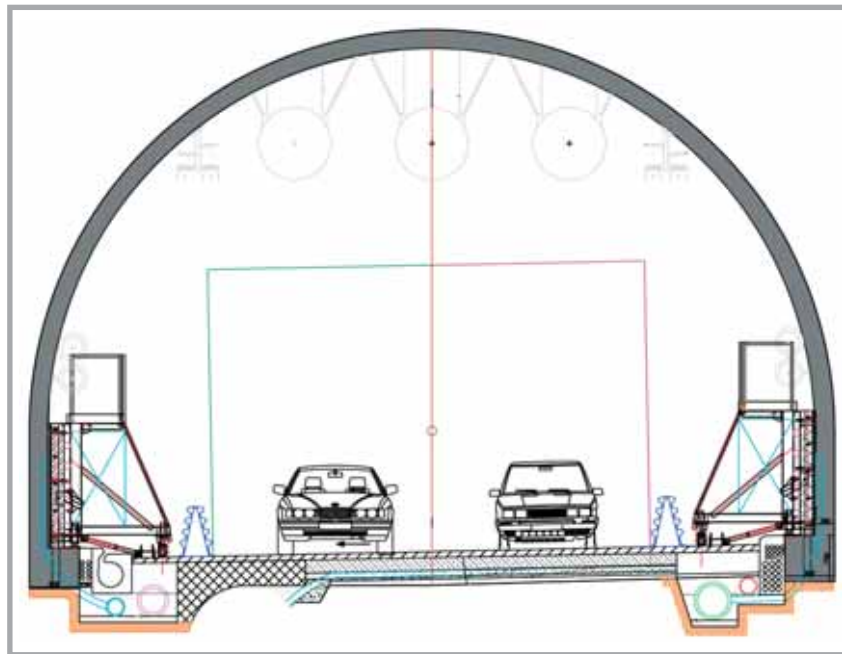


Figure 4
Coffrage
des piédroits
*Side wall
shuttering*



Tube nord : mise
en œuvre des drains
dans l'épaisseur du béton
drainant

*North tube : laying drains
in the draining concrete
layer*

cialement adaptés au chantier, conçus et fabriqués par la société CMC en collaboration avec le service Méthodes de Bec Frères.

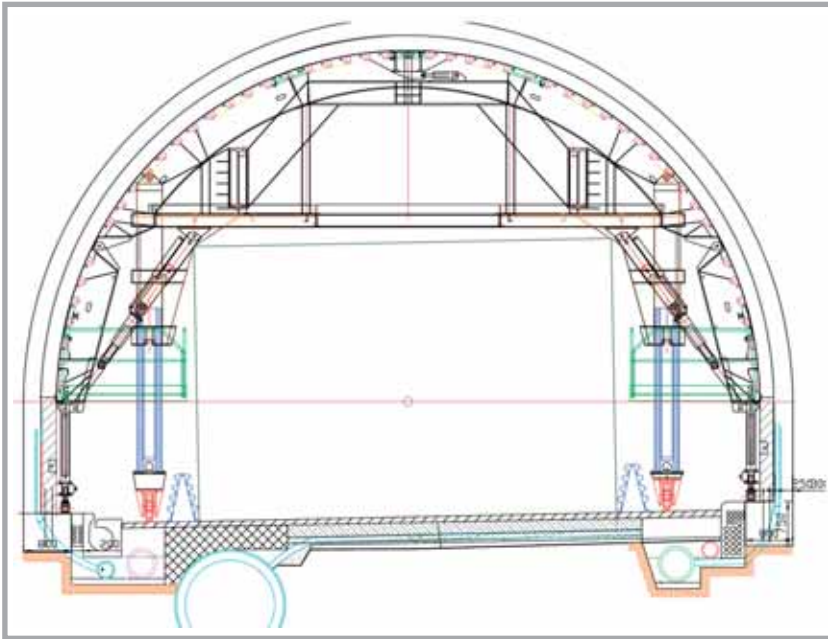
D'un poids unitaire de 120 t, ces matériels auront la particularité de devoir permettre leur repli pour rentrer en tunnel afin d'échapper aux ventilateurs existants et aux rampes d'éclairage.

En effet, comme les travaux sont exécutés de nuit et que le jour la circulation est rétablie à l'intérieur du tunnel, il faut que tous les équipements du tunnel soient opérationnels : éclairage, ventilation et signalisation doivent être conservés, ou s'ils sont à changer, programmés de telle sorte que les équipements minimum soient en place pendant l'utilisation du tunnel.

Un premier outil est rentré en milieu du tunnel depuis la tête ouest en position replié, l'outil roule sur des rails Burbach dont le tunnel a été préalablement équipé ; il a été précédé par le portique d'étanchéité.

Figure 5
Outil coffrant
en position
de coffrage

*Sectional
formwork
in shuttering
position*



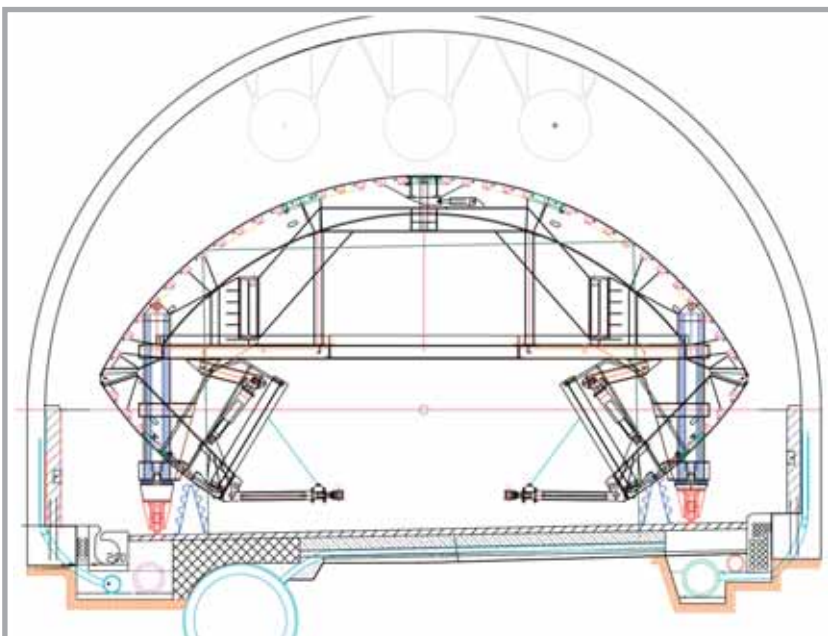
Tube nord : terrassement
voie lente, découverte
du ruisseau busé
dans le tube en D1500,
démolition des caniveaux
et fouilles
d'assainissement

*North tube : slow lane
earthworks, stripping
topsoil from the stream
conveyed through
a culvert in the tube
at D1500, gutter
demolition and drainage
system excavation*



Figure 6
Outil coffrant
en position repliée

*Sectional formwork
in folded-up position*



Les deux humidificateurs de voûte sont rentrés en tunnel suivi du deuxième coffrage tunnel : la cinématique de réalisation du revêtement prévoit un avancement par plots de 12,50 m depuis le milieu du tunnel jusqu'aux deux extrémités.

Ainsi sur deux fois 100 m nous rencontrons à l'intérieur du tube en chantier un "train travaux" constitué de :

- ◆ un plot en cours d'enlèvement de l'éclairage tunnel existant ;
- ◆ un portique d'étanchéité équipant un plot en géomembrane ;
- ◆ deux plots déjà étanchés ;
- ◆ un plot en cours de bétonnage ;
- ◆ un plot en cure par humidification ;
- ◆ un plot en cours de remontage des éclairages du tunnel. L'ensemble de ces plots sera éclairé par des rampes provisoires afin d'assurer une luminosité suffisante en circulation de jour.

Nous circulons dans un "tunnel" à l'intérieur du tunnel.

Le béton autoplaçant sera distribué par une centrale d'injection en position fixe dans l'outil avec cinq pipes alimentées par une pompe mobile.

Le cycle travaux prévoit un temps de séchage de 16 heures (de 5 heures fin du bétonnage à 21 heures début du décoffrage de l'outil).

Compte tenu des exigences de résistance demandées à ce béton et de sa grande exothermie, une cure du béton par humidification s'est imposée lors de la préparation du chantier.

Ont donc été conçus deux portiques de dimensions identiques à l'outil coffrant permettant, dès la fin de déplacement de ce dernier, une humidification du parement à l'aide d'un géotextile plaqué sur le béton durci.

Outil coffrant en position de coffrage

Cf. figure 5.

Outil coffrant en position repliée

Cf. figure 6.

Le portique de cure

Cf. figure 7.

■ LE BÉTON AUTOPLAÇANT

Les bétons autoplaçants sont des bétons très fluides mis en œuvre par gravité, sans vibration. Ils doivent leur grande fluidité à l'emploi d'adjuvants (superplastifiant et éventuellement agent rétenteur d'eau) et, en aucun cas, à une augmentation de la quantité d'eau. Ceci leur permet d'offrir un bon comportement à l'état frais (ni ségrégation, ni ressuage) et à l'état durci (résistance mécanique et durabilité).

Les exigences imposées au béton de ce chantier

sont nombreuses et parfois délicates à concilier. Elles proviennent soit du CCTP, soit des cadences choisies par l'entreprise.

Elles concernent :

- ◆ la rhéologie à l'état frais conforme aux recommandations de l'AFGC sur les BAP ;
- ◆ la résistance à court terme (10 MPa à 16 heures) et à long terme (C45/55 pour une classe d'environnement XF2) ;
- ◆ la durabilité vis-à-vis :
 - de l'alcali-réaction (niveau de prévention intermédiaire entre la classe B et C des recommandations du LCPC),
 - de l'action du gel et des sels de déverglaçage (classe G + S, résistance au gel modéré avec salage fréquent, suivant les "Recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons pour les parties d'ouvrages non protégées des intempéries et soumises à l'action du gel", établies par le groupe de travail Rhône-Alpes).

De nombreux arguments militaient pour l'utilisation de béton autoplaçant :

- ◆ la facilité de mise en œuvre des BAP permet de réduire le temps de bétonnage et favorise l'organisation du chantier en vue d'une réouverture quotidienne à la circulation ;
- ◆ la grande fluidité du matériau (slump supérieur à 600 mm à la table d'affaissement) garantit un parfait remplissage du coffrage malgré la faible épaisseur du revêtement, et ceci même en présence de ferrailage pour les plots équipés d'accélérateurs en voûte ;
- ◆ en supprimant la vibration et donc les nuisances sonores, on améliore considérablement les conditions de vie du chantier et de l'environnement proche ;
- ◆ cet avantage du BAP est particulièrement important en milieu confiné. Des mesures acoustiques réalisées lors de la vibration du béton en tunnel avaient déjà mis en évidence des niveaux sonores inadmissibles (105 dB) ;
- ◆ les contraintes de formulation liées à la nécessité d'obtenir une grande fluidité tout en évitant la ségrégation conduisent à concevoir des bétons dont la durabilité est très intéressante ;
- ◆ la bonne qualité de parement (peu de bullage) doit permettre de réaliser la mise en peinture des piédroits dans d'excellentes conditions, sans ragréage préalable.

Tous ces avantages ne doivent pas faire oublier certaines contraintes à intégrer impérativement pour ne pas remettre en cause les gains attendus :

- ◆ le coffrage a été dimensionné pour reprendre la forte poussée du béton autoplaçant. Par souci de sécurité, la pression hydrostatique totale est prise en compte ;
- ◆ l'étanchéité de l'outil doit être particulièrement soignée (arêtes, abouts) ;
- ◆ la qualité de surface du coffrage doit être très bonne car toute blessure apparaîtra de façon rigoureusement identique au démoulage. Ceci est

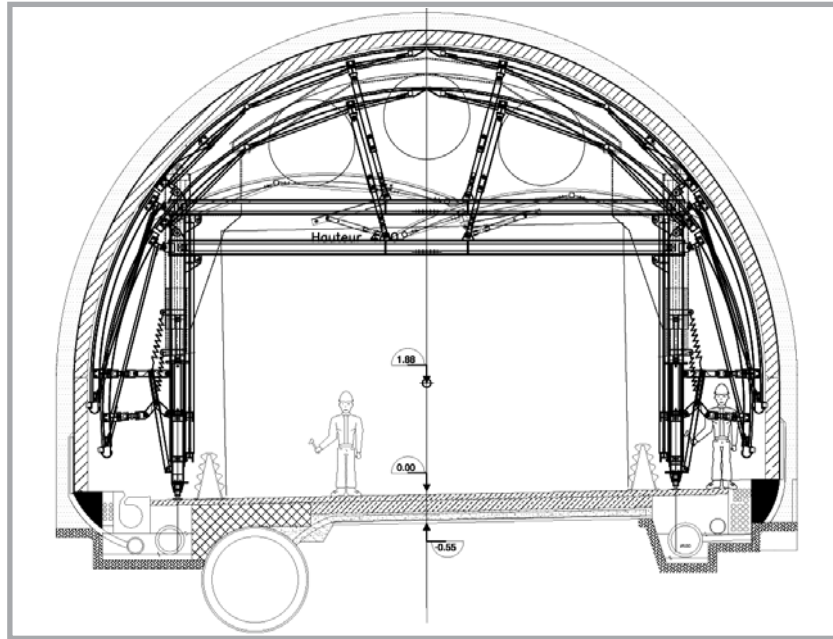


Figure 7
Le portique de cure
The curing gantry



Tube nord : coffrage et ferrailage de la dalle réalisée sur le collecteur D1500 à raison de 50 m par nuit

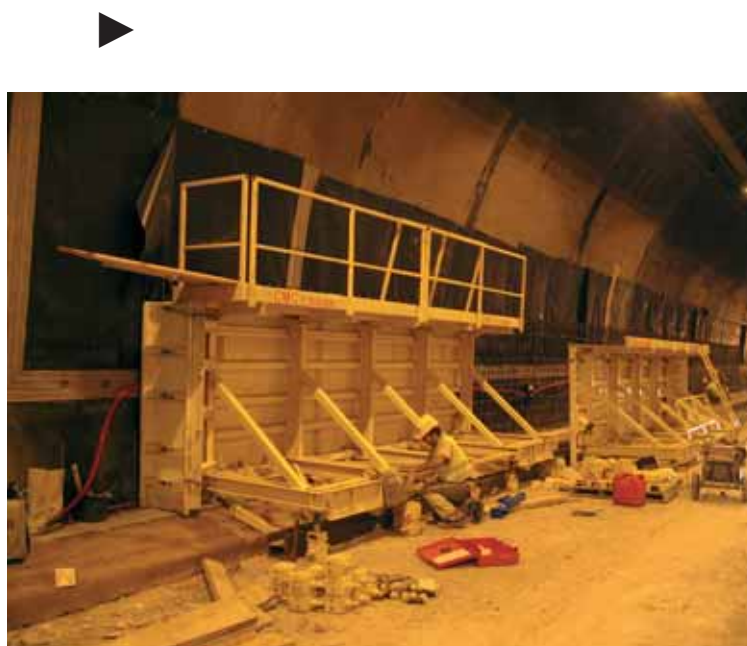
North tube : Shuttering and reinforcement for the slab constructed on main drain D1500 at a rate of 50 metres per night

LES PRINCIPALES QUANTITÉS TUBE NORD

- Aciers HA pour dalle sur D1500 : 200 t
- Aciers HA pour piédroits : 190 t
- Aciers HA en voûte : 35 t
- Étanchéité : 25 000 m²
- Béton VRD et assainissement : 4 100 m³
- Béton de voûte : 6 550 m³

De jour	De nuit
<p>Grenoble – Aix-les-Bains:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation en Tube Nord • 1 voie de circulation à contre-sens en Tube Sud <p>Aix-les-Bains - Grenoble :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Sud 	<p>Tube Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation sens Grenoble – Aix-les-Bains • 1 voie de circulation sens Aix-les-Bains – Grenoble <p>Tube Nord en travaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Décaissement de la voie rapide à la raboteuse • Démolition des caniveaux • GNT et béton drainant • 20 cm de GB4 en 2 couches
<p>Grenoble – Aix-les-Bains:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation en Tube Nord • 1 voie de circulation à contre-sens en Tube Sud <p>Aix-les-Bains - Grenoble :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Sud 	<p>Tube Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation sens Grenoble – Aix-les-Bains • 1 voie de circulation sens Aix-les-Bains – Grenoble <p>Tube Nord en travaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Décaissement de chaussée voie lente • Démolition des caniveaux • GNT et béton drainant
<p>Grenoble – Aix-les-Bains:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Nord <p>Aix-les-Bains - Grenoble :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Sud 	<p>Tube Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation sens Grenoble – Aix-les-Bains • 1 voie de circulation sens Aix-les-Bains – Grenoble <p>Tube Nord en travaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dalle béton armé sur D1500 (ruisseau existant) • 20 cm de GB4 sur béton drainant • Démolition de la fondation par sciage et rabotage puis terrassement en fouilles • Assainissement, VRD et caniveaux à fente, mutitubulaires.
<p>Grenoble – Aix-les-Bains:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Nord <p>Aix-les-Bains - Grenoble :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Sud 	<p>Tube Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation sens Grenoble – Aix-les-Bains • 1 voie de circulation sens Aix-les-Bains – Grenoble <p>Tube Nord en travaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etanchéité sur revêtement existant • Coffrage et ferrailage des piédroits voie lente par plots de 25 m de la tête ouest au milieu du tube • Bétonnage en béton autoplaçant C45/55
<p>Grenoble – Aix-les-Bains:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Nord <p>Aix-les-Bains - Grenoble :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Sud 	<p>Tube Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation sens Grenoble – Aix-les-Bains • 1 voie de circulation sens Aix-les-Bains – Grenoble <p>Tube Nord en travaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Démolition de la fondation par sciage et rabotage puis terrassement en fouilles • Assainissement, VRD et caniveaux à fente, mutitubulaires. • Etanchéité sur revêtement existant • Coffrage et ferrailage des piédroits voie lente par plots de 25 m de la tête ouest au milieu du tube • Bétonnage en béton autoplaçant C45/55
<p>Grenoble – Aix-les-Bains:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Nord <p>Aix-les-Bains - Grenoble :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Sud 	<p>Tube Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation sens Grenoble – Aix-les-Bains • 1 voie de circulation sens Aix-les-Bains – Grenoble <p>Tube Nord en travaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etanchéité sur revêtement existant • Coffrage et ferrailage des piédroits voie lente par plots de 25 m de la tête ouest au milieu du tube à la tête Est • Bétonnage en béton autoplaçant C45/55
<p>Grenoble – Aix-les-Bains:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Nord <p>Aix-les-Bains - Grenoble :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 voies de circulation en Tube Sud 	<p>Tube Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 voie de circulation sens Grenoble – Aix-les-Bains • 1 voie de circulation sens Aix-les-Bains – Grenoble <p>Tube Nord en travaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dépose de l'éclairage du tunnel en avant de l'outil • Dépose des ventilateurs existants • Préparation du support d'étanchéité • Etanchéité de la voûte par géomembrane • Coffrage de la voûte avec 2 coffrages outils de 12,50 m • Bétonnage de l'anneau en béton autoplaçant • Cure du béton à l'aide d'un outil humidificateur • Reprise de l'éclairage du tunnel • Pose des nouveaux accélérateurs • Revêtement de chaussée en BBME

Tableau I
Phasage des travaux
Work schedule



Quelques photos récentes du chantier
A few recent photos of the project

surtout important pour les piédroits, sur environ 3 m de hauteur ;

◆ pour bénéficier pleinement des effets des adjuvants et assurer une bonne vitesse de montée en résistance (exigence de 10 MPa à 16 heures), des mesures spécifiques peuvent être nécessaires par temps froid ;

◆ le personnel doit avoir un niveau de compétence élevé (précautions lors du maniement des coffrages, de l'application du produit de démoulage, de l'utilisation de la matriométrie, du décoffrage, de la cure...).

Ce sera la première réalisation d'une voûte en béton autoplaçant en France.

Sa formule a été mise au point par le laboratoire de Sigma Béton, il sera fabriqué dans les centrales BPE de Béton de France et Béton Rhône Alpes basées sur La Motte Servolex (banlieue de Chambéry).

Le contrôle extérieur des bétons est assuré par le LRPC du CETE de Lyon qui est associé aux actions de recherche du CETU dans ce domaine.

■ PHASAGE DES TRAVAUX

Cf. tableau I.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Etat

Maître d'œuvre

DDE 73 SGT/ETN4 assisté du CETU

Titulaire du marché

Groupement d'entreprises solidaires constitué de Bec Frères (mandataire) - Satelec - Scred Sud Est

- Bec Frères réalise les travaux de génie civil
- Satelec réalise les équipements du tunnel
- Scred Sud Est réalise les terrassements, VRD et chaussées

Principaux fournisseurs et sous-traitants

- CMC pour le coffrage des piédroits et coffrage tunnel
- Prati pour l'étanchéité
- Béton de France et Béton Rhône Alpes pour les bétons autoplaçants
- Mecsider pour les armatures béton armé
- Seco-Rail pour le sciage et le rabotage des piédroits

ABSTRACT

The Monts tunnel – Renovation of the structure

B. Boy, J.-P. Mizzi

The "tunnel des Monts" is located on the RN 201 urban expressway which sails round the city of Chambéry. It consists of two parallel one-way tubes of approximately 900 m long, connected by three communication galleries. Each tube consists of a 3-lane road.

After more than 20 years of operation of this tunnel built without watertightness, its equipments present some disorders or dysfunctions due, for most of them, to a premature ageing caused by the aggressive environment and the seepage waters.

Because of the role of the tunnel des Monts in the commuting traffic (75 % of the 85 000 vehicles of the daily traffic) and in the East-West (Italy-Lyon) and North-South (Annecy-Grenoble) transit traffic, two lanes per direction must be kept open all the day long during the whole duration of the works. Subsequently, works will be performed by night, one of the tube being completely closed from 19:30 to 6:30, six nights per week, during 8.5 months in 2005 for the North tube, in 2006 for the South tube.

Taking into account all the difficulties, fast and reliable techniques must be used. Watertightness will be ensured by a synthetic lining system fixed on the vault and protected by a thin innovating coating in self compacting concrete. During this step of the works, traffic will be maintained with an unchanged gauge under the two formworks.

RESUMEN ESPAÑOL

El túnel de los Montes – Rehabilitación de la estructura

B. Boy y J.-P. Mizzi

El túnel de los montes se encuentra ubicado en la carretera nacional RN 201, vía rápida urbana que atraviesa la aglomeración de Chambéry. Este túnel está compuesto por dos tubos unidireccionales paralelos de 900 metros aproximadamente y que constan de tres vías de circulación y interconectadas por tres galerías de comunicaciones. Después de más de 20 años de explo-

tación de esta estructura construida sin hermeticidad, los equipos presentan cierto número de disfuncionamientos y de degradaciones derivadas, para la mayor parte de ellas, a un envejecimiento acelerado debido al ambiente particularmente agresivo y de las aguas de infiltración.

El papel que desempeña del túnel de los Montes en los desplazamientos hogar-trabajo de la aglomeración (75 % del tráfico diario de 85 000 vehículos) y en los enlaces de tránsito Este-Oeste (Italia-Lyón) y Norte-Sur (Annecy-Grenoble) ha impuesto el mantenimiento durante la jornada de dos vías de circulación por sentido para toda la duración de la obra. Por consiguiente, los trabajos se ejecutan de noche con un cierre de uno de los tubos entre las 19 h 30 y las 6 h 30 a razón de seis noches por semana sobre un período de ocho meses y medio en 2005 para el tubo Norte y ocho meses y medio en 2006 para el tubo Sur.

Habida cuenta de estas dificultades, se han previsto diversas técnicas rápidas y fiables para la rehabilitación de la estructura. La hermeticidad estará garantizada por una geomembrana sintética pegada al revestimiento existente y estará protegida por un revestimiento fino – innovador para los túneles – de hormigón autopegante. Esta etapa estará realizada manteniendo bajo las dos herramientas de encofrado dos vías de circulación con un gálibo idéntico.

Le regain d'un métier Construction

Après l'achèvement du chantier marathon du lot 2 du métro de Toulouse, et tandis que se poursuivent les travaux des puits de secours de l'A86 Ouest en Île-de-France, plusieurs opérations en cours (tunnel du Lioran) ou sur le point de démarrer (à Paris et à Besançon) marquent le renouveau des travaux souterrains chez Sogea Construction (VINCI). Maîtrisant ces techniques, réorganisée et déterminée, l'entreprise entend stabiliser à bon niveau son activité sur ce marché en développement, consolider son image en termes de sécurité et de politique environnementale et conforter sa place dans le club fermé des cinq ou six spécialistes reconnus du métier.

En ce printemps 2005, Christophe Persoz, directeur des travaux souterrains de Campenon Bernard TP, filiale de Sogea Construction (VINCI), considère sans nostalgie l'achèvement du lot 2 du métro de Toulouse, chantier phare de l'entreprise depuis 2001 mais aussi chantier complexe dans l'exécution des stations et difficile par la nature des terrains rencontrés, et il recense avec satisfaction les opérations en cours et les commandes enregistrées depuis environ deux ans : tunnel du Lioran (Cantal) ; puits de secours du second tronçon de Socatop (A86 Ouest) ; tunnel routier du Bois-de-Peu à Besançon ; tunnel de stockage Ivry-Masséna-Austerlitz (Tima), à Paris, et creusement de la galerie du déversoir d'orage Bièvre, ou encore la participation au creusement du laboratoire d'essai de l'Andra à Bure (Meuse) ou au prolongement du métro de Marseille (avec GTM Construction et Spie Batignolles TPCI). Ce déve-

loppement, qui a vu le carnet de commandes passer de 27 M€ en 2003 à 35 M€ en 2004 et 70 M€ cette année, lui paraît un juste retour des efforts de l'entreprise, qui s'est mobilisée et réorganisée pour reprendre le flambeau d'une tradition historique apportée à VINCI Construction par Campenon Bernard.

■ "TOUS LES MOYENS AUX CHANTIERS"

Au sein du département TP France, qui regroupe les "génie civilistes" de Sogea, Campenon Bernard TP, à côté de Dodin et de Muller Génie civil, a pour vocation de réaliser cette activité, où interviennent par ailleurs deux entités régionales : Campenon Bernard Régions (en Rhône-Alpes) et Campenon Bernard Méditerranée. Réduite au strict nécessaire, car "tous les moyens sont sur les chantiers", la direction des travaux souterrains, basée à Rungis, se limite donc à quatre personnes, dont deux ingénieurs d'études de prix, et vise avant tout la réactivité dans les réponses aux appels d'offres. Au sein de VINCI Construction, elle ne manque ni de soutien ni de ressources, puisque les travaux souterrains sont aussi l'un des points forts de VINCI Construction Grands Projets (tunnels du Panhardensch aux Pays-Bas, de Soumagne en Belgique, de Mitholz en Suisse, etc.), et que le partage d'expériences y a été institué au sein du groupe depuis plus de dix ans par Jean-Claude Amet, aujourd'hui directeur de l'ingénierie des travaux souterrains de VINCI Construction Grands Projets, sous la forme du club Travaux souterrains.

Maîtrisant les trois techniques – creusement au tunnelier, à l'explosif et en traditionnel – et disposant d'un procédé de guidage automatique, CAP, qu'elle commercialise par ailleurs, Sogea investit dans le matériel (2 millions d'euros en 2 ans), et dans les hommes. Six ingénieurs ont ainsi été récemment recrutés, et une formation de "technicien de travaux de galerie" a été mise en place avec le CFC d'Egletons à l'initiative de Campenon Bernard Méditerranée (cf. encadré "Une expérience pionnière de recrutement-formation") pour assurer la relève des compagnons chevronnés partant en retraite. Une autre facette de l'investissement dans les hommes est la politique de prévention-sécurité. Cette priorité de l'entreprise, qui a conduit Sogea à instituer les "quarts d'heure sécurité" sur l'ensemble de ses chantiers, l'amène aujourd'hui à proposer une approche renouvelée de la forma-

UNE EXPÉRIENCE PIONNIÈRE DE RECRUTEMENT-FORMATION

"Le départ progressif de notre personnel spécialisé et la multiplication de projets de travaux souterrains dans la région nous ont conduits il y a quelques années à nous organiser pour recruter et former des jeunes, explique Pascal Taillardat, directeur de l'agence génie civil de Campenon Bernard Méditerranée à Nice. Quelques réunions internes, auxquelles s'était associé Campenon Bernard Régions, qui réalise des travaux souterrains en Rhône-Alpes, nous ont permis de définir un profil de compétences, et nous sommes tout naturellement entrés en contact avec le centre de formation continue (CFC) d'Egletons, en Corrèze, qui est un vrai campus dédié aux travaux publics avec ses différents établissements (IUT, ET, EATP, etc.) et un vivier, avec ses 3 000 étudiants.

En 2002, je me suis rendu au forum qui est organisé chaque printemps, j'ai fait part de notre recherche, diffusé des questionnaires et récolté à peu près 70 réponses de jeunes de tous les niveaux : brevet de technicien, CAP, BTS et même DUT génie civil. Nous en avons retenu 12, que nous avons embauchés en 2003 dans le cadre d'un contrat inédit dans le BTP : une embauche en CDI avec une rémunération mensuelle fixe à hauteur du SMIC et la prise en charge de leur hébergement, de leur nourriture et d'un trajet par mois. En contrepartie, ils devaient s'engager sur deux ans et suivre la formation jusqu'au bout.

Les 1 000 heures de formation se sont partagées pour moitié entre Egletons et le chantier du tunnel de la Condamine, un tunnel routier de 780 m de long et 120 m² de section creusé pour une petite partie à l'explosif et pour l'essentiel au BRH (brise-roche hydraulique) dans la banlieue nord de Nice. Pendant cette formation, on leur a adjoint pour tuteurs de jeunes retraités qui les ont accompagnés à Egletons et encadrés à la Condamine où ils ont été très bien perçus par les équipes. Aujourd'hui, nos 12 "techniciens de travaux de galerie", sont toujours là : deux chez Campenon Bernard Régions et les 10 autres provisoirement intégrés dans nos équipes de... génie civil, car les aléas de la vie – notamment politique – ont remis à plus tard nombre de projets. De notre côté, nous sommes prêts – je dirai même impatients – pour refaire du souterrain. En cas de besoin, le dispositif de formation existe, et nous n'avons qu'à le réactiver..."

historique de Sogea

UNE APPROCHE RENOUVELÉE DES FORMATIONS

Après avoir animé en mars et avril dernier deux journées de formation à l'intention des chefs d'équipe des chantiers des puits de l'A86 et de la station d'épuration d'Achères, Delphine Morel assurera en septembre une formation sur le chantier du tunnel du Bois-de-Peu, près de Besançon. Intervenant dans l'entreprise après un an passé à évaluer les pratiques et les besoins en prévention-sécurité, cette psychologue de formation cherche avant tout à susciter une prise de conscience, condition première pour que chacun puisse devenir "acteur" de la prévention. Sa façon d'aborder le sujet consiste à faire une large place à l'information sur le risque, la réalité de l'accident du travail et ses conséquences du point de vue de la personne, de l'entreprise et de la société, de façon que chacun dispose des éléments lui permettant "de se situer". Dans un deuxième temps, elle cible le rôle que chacun a à jouer et ses implications en terme de communication. "Comme la qualité, estime-t-elle, la sécurité, c'est tout un système à mettre en place. Et dans ce processus les synergies sont essentielles."

À cet égard, elle attache une grande importance aux chefs d'équipe, "un maillon essentiel dans la liaison entre le bureau et les compagnons", mais dont le rôle en tant que modèle, reste insuffisamment valorisé. Pour faire bouger les choses et permettre à chacun de mieux comprendre les contraintes de l'autre, Delphine Morel invite par exemple les chefs d'équipe à passer une journée en compagnie des conducteurs de travaux, et réciproquement.

Au Bois-de-Peu, où elle s'adressera à un auditoire élargi à la totalité de l'équipe de réalisation, ses objectifs seront les mêmes, mais elle adaptera ses outils, et pour favoriser la prise de conscience, elle s'appuiera sur le support de l'image après avoir filmé des situations de travail.

tion (cf. encadré "Une approche renouvelée des formations").

"L'objectif, en travaillant nos points forts – maîtrise technique, préparation des méthodes, exigence sécurité – et en faisant de nos chantiers des modèles sur le plan de la protection environnementale, est de consolider notre place de quatrième dans la profession et d'accéder à des chantiers plus importants", ponctue Christophe Persoz. Un investissement qui, à terme, place l'entreprise sur la trajectoire d'un marché souvent orienté vers les solutions souterraines et riches, on l'espère à l'avenir, en projets de ferroutage (photo 1).

■ TUNNEL DU LIORAN : L'ANCIEN ET LE MODERNE

Le 2 juin dernier, sur l'axe Clermont-Ferrand/Aurillac et sous le Puy de Masseboeuf (Cantal), a été percé le nouveau tunnel du Lioran, un ouvrage de 1 457 m destiné à remplacer le tunnel existant plus que cent cinquantaire et de moins en moins adapté au trafic. D'un profil parallèle à cet ouvrage dont il est séparé par quelques dizaines de mètres, le nouveau tunnel suit par ailleurs le tracé d'un tunnel ferroviaire situé quelque 15 m plus en profondeur. "La proximité de ces ouvrages, tous deux en



service, a été l'une des contraintes clés de notre chantier, explique Paul Roux, le directeur de chantier (Spie Batignolles TPCI) du groupement, car le tunnel était creusé à l'explosif." Côté rail, les tirs devaient s'organiser selon des créneaux précisément définis par la SNCF. Côté route, les automobilistes du secteur étaient prévenus des tirs par l'intermédiaire de panneaux à message variable installés à Aurillac et à Murat, et lorsque ceux-ci

Christophe Persoz
DIRECTEUR DES TRAVAUX
SOUTERRAINS
Campenon Bernard TP

Paul Roux
DIRECTEUR DE CHANTIER
(TUNNEL DU LIORAN)
Spie Batignolles TPCI

André Irthumb
RESPONSABLE ADMINISTRATIF
(TUNNEL DU LIORAN)
Campenon Bernard TP

Frédéric Dallot
DIRECTEUR DE TRAVAUX
Campenon Bernard TP

Philippe Laborie
INGÉNIEUR TRAVAUX
Campenon Bernard TP

Patrick Gauthier
DIRECTEUR DE TRAVAUX
Campenon Bernard TP

Franck Moine
INGÉNIEUR TRAVAUX
Campenon Bernard TP

Pascal Taillardat
DIRECTEUR DE L'AGENCE
GÉNIE CIVIL DE NICE
Campenon Bernard TP

Delphine Morel
ANIMATRICE DE FORMATIONS
SÉCURITÉ

Photo 1
Métro de Toulouse (lot 2) : la station Compans Caffarelli, en cours de construction. Les stations sont réalisées en paroi moulée. Afin de réduire au maximum les emprises de travaux, quatre d'entre elles ont été réalisées "en taube" sous la dalle de couverture

Toulouse metro (work section 2) : The Compans Caffarelli station undergoing construction. The stations are constructed by the slurry wall technique. In order to reduce the land occupied by the works insofar as possible, four of the stations were constructed "by mole technique" under the cover slab

Photo 2
Tunnel du Lioran. Après le percement du nouvel ouvrage, le 2 juin dernier, il ne restait plus qu'à excaver la quatrième et dernière galerie de liaison avec l'ancien tunnel, qui sera transformé en galerie de secours

Lioran tunnel. After drilling the new structure, on 2 June last, only the fourth and last gallery remained to be excavated, to provide a link with the old tunnel, which will be converted into an emergency gallery



Photo 3
Tunnel du Lioran. Préalables au percement, d'importants terrassements ont dû être réalisés au niveau des têtes de tunnel (ici, côté Aurillac)

Lioran tunnel. Prior to drilling, major earthworks had to be performed at the level of the tunnel portals (here, Aurillac side)



Photo 4
Tunnel du Lioran. La section du front de taille atteignant 100 m², l'utilisation d'un robofore a permis de faciliter et d'accélérer la mise en place de l'explosif et la cadence de tir

Lioran tunnel. The cross section of the tunnel face being as large as 100 sq. m, a Robofore driller was used to facilitate and accelerate placing of the explosive and the pace of blasting



▶ étaient exécutés, la circulation était interdite dans l'ancien tunnel.

■ TROIS POSTES ET QUATRE ÉQUIPES

Pour respecter le délai de réalisation fixé à 22 mois à partir de l'ordre de service d'exécution du 10 mai 2004, une organisation du travail en trois postes et quatre équipes a été mise en place, et le creusement s'est opéré par les deux faces.

De fait, la mise à disposition du point d'attaque côté Murat n'a pas permis d'y commencer le creusement avant janvier 2005, "de sorte qu'un quart de la galerie a pu être creusé depuis ce côté", constate Paul Roux. Le terrain, composé de brèches et de laves un peu fracturées, n'a pas réservé de mauvaise surprise aux mineurs. Mis en place efficacement et rapidement sur le front de taille, d'une section de 100 m², à l'aide d'un robofore à trois bras, l'explosif a permis de réaliser des volées jusqu'à 4 m. De qualité plutôt bonne, la voûte une fois purgée était consolidée par béton projeté fibré et boulonnage, et "à la différence d'un ouvrage réalisé au tunnelier, qui est tout de suite « fini » avec son revêtement de voussoirs, la galerie a gardé ici une allure de caverne, jusqu'à l'entrée en action du coffrage de tunnel, qui bétonnera définitivement la voûte par pas de 10 m", observe André Irthumb, responsable administratif (gestion et finances) du groupement (Campenon Bernard TP).

L'excavation du tunnel principal étant terminée, il ne reste plus aux "mineurs" du Lioran qu'à percer la dernière des quatre galeries qui relieront l'ouvrage à l'ancien tunnel, reconverti en galerie de secours... avant de rejoindre, pour une partie d'entre eux, le chantier du Bois-de-Peu (photos 2, 3 et 4).

■ LE BOIS-DE-PEU : FESTIVAL TECHNIQUE

À l'est de Besançon, le futur contournement autoroutier de la ville empruntera la voie dite des Mercureaux (7 km), dont le tracé butte sur la colline du Bois-de-Peu. C'est là qu'a démarré début juillet

LE LIORAN

Maître d'ouvrage

Etat – Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer

Maître d'œuvre

(AIOA Arrondissement interdépartemental des ouvrages d'art)

Entreprises

Groupement Spie Batignolles TPCI (mandataire), Campenon Bernard TP (Sogea Construction), Chantiers Modernes Rhône Alpes (GTM Construction)

- Longueur de l'ouvrage : 1 457 m

- Longueur totale des galeries de liaison : 560 m

- Effectif en pointe : 120 personnes (travail en trois postes)

- Délai contractuel : 22 mois

- Montant des travaux : 34,5 M€ HT

2005 le percement du tunnel bitube qu'emprunteront les voies montantes et descendantes (2 x 2 voies) du futur axe routier.

"L'ouvrage est long de 520 m, la section des galeries est de 100 m², mais c'est la morphologie du terrain et ses plissements verticaux qui font la particularité du chantier, explique Frédéric Dallot (Campenon Bernard TP) car l'ouvrage traversera 18 unités géologiques différentes, du calcaire aux marnes, c'est-à-dire du bon et du moins bon."

Cette particularité du sous-sol a pour conséquence directe de faire du chantier un festival technique, car, d'un terrain à l'autre, ni le creusement ni le soutènement ne sont les mêmes, et quatre profils de soutènement (de P1 à P4) ont dû être définis. Dans les parties calcaires, où le creusement se fera à l'explosif comme au Lioran, P1 associe béton projeté et boulons d'ancrage. Dans les autres parties, selon le terrain, seront utilisés P2, P3 (cintres métalliques, béton projeté, boulonnage ou clous) ou P4 (présoutènement par voûte parapluie, cintres métalliques et béton projeté). Enfin, plus le terrain est meuble, plus le pas d'avancement sera réduit (jusqu'à 1,25 m).

"D'après les études, la répartition des profils devrait être de 50 à 60 % pour P1, de 10 % pour P4, le reste se partageant entre P2 et P3, indique Frédéric Dallot. Toutefois, les surprises ne sont pas à exclure, puisqu'elles sont le propre des travaux souterrains."

■ DES VIDÉOS POUR FORMER LES FUTURES RECRUES

Plus remarquable par ses aspects techniques que par ses dimensions, le projet du Bois-de-Peu sera mis à contribution pour illustrer le volet "travaux souterrains" de la Banque numérique du savoir mé-

tier (BNSM), un recueil des métiers très largement basé sur l'image (vidéo, images de synthèse) qu'a commencé à constituer Sogea voici une dizaine d'années à des fins de formation. Guidée par Gilles Delage, conducteur de travaux chez Sogea, une équipe de tournage viendra filmer les travaux comme elle l'a fait auparavant pour les "niches" de Socatop, afin de familiariser les futures recrues de l'entreprise avec les bonnes pratiques d'exécution. Enfin, comme nombre d'autres chantiers de Sogea, celui-ci démarre avec des objectifs de recrutement de jeunes, "déjà fixés à sept embauches durables", souligne Frédéric Dallot (photo 5).

■ RACCORDEMENT DO BIÈVRE-TIMA : UNE LIAISON POUR L'ENVIRONNEMENT

Dans le paysage de travaux qu'est la ZAC Masséna (Paris 13^e), Campenon Bernard TP était à la mi-juin sur le point de s'attaquer au maillon terminal du DO Bièvre (le déversoir d'orage Bièvre), un ouvrage d'assainissement réalisé pour le compte du Syndicat interdépartemental d'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP). Venue des Yvelines, la rivière Bièvre, dont le cours parisien est devenu souterrain au XX^e siècle, se jette dans la Seine en aval de la gare d'Austerlitz. Pour éviter que ses eaux fortement chargées en pollution en cas de fortes pluies ne s'y déversent directement, un ouvrage complexe de raccordement de divers collecteurs, le DO Bièvre, a été aménagé en sous-sol dans le prolongement de la rue Watt, non loin de la Seine. De là, les eaux collectées devront se déverser dans le tunnel de stockage Ivry-Masséna-Austerlitz (cf. encadré "Tima").

TIMA : LE NOUVEAU MAILLON DU SYSTÈME D'ASSAINISSEMENT PARISIEN

Qu'est-ce qu'un tunnel? Une voie de passage, mais aussi un réservoir. Telle sera la double vocation de la galerie qui va être creusée rive gauche, non loin de la bibliothèque François Mitterrand dans le cadre d'un vaste projet piloté par le Siaap, destiné à diminuer le volume d'eaux pluviales non traitées qui se déversent dans la Seine. Le principe : capter et stocker les eaux puis les acheminer vers la station d'épuration de Valentigney (Val-de-Marne) pour les traiter. Pour creuser la galerie en direction d'Ivry, qui sera longue de 2000 m (soit un volume d'environ 80000 m³), c'est le tunnelier de Campenon Bernard TP (diamètre : 7,77 m) qui a foré les 5 km du lot 2 du métro de Toulouse qui a été choisi. En cours de reconditionnement à Mantes, celui-ci sera le moment venu livré par voie fluviale et le creusement commencera en 2006.

Photo 5
À la fin avril, au pied de la colline du Bois-de-Peu, près de Besançon, tout est prêt pour le creusement en parallèle des deux galeries, qui a commencé début juillet

At the end of April, at the foot of the Bois-de-Peu hill, near Besançon, everything is ready to drive the two galleries in parallel, and the work began in early July

LE BOIS-DE-PEU

Maître d'ouvrage

ETAT, représenté par le directeur départemental de l'Équipement du Doubs

Maître d'œuvre

Direction départementale de l'Équipement du Doubs, Service Grands Travaux (M. Fleury)

Entreprise

Groupement Campenon Bernard TP (mandataire), Spie Batignolles TPCI, Chantiers Modernes Rhône-Alpes

- Longueur de l'ouvrage : 520 m
- Effectif : 55 personnes
- Délai contractuel : 22 mois
- Montant des travaux : 26,25 M€





Photo 6
La tête de coupe de Jupiter, le tunnelier à pression de terre qui doit forer la galerie de liaison entre le DO Bièvre et le puits d'accès à Tima

The cutting head of Jupiter, the Earth Pressure Balance TBM which is to bore the link gallery between the Bièvre storm overflow and the access shaft at Tima



"La galerie de liaison à creuser est longue de 127 m et d'un diamètre de 3,20 m (diamètre fini 2,50 m), elle se situe sous le niveau de la Seine, dans une couche de calcaire grossier surmontée de terrains alluvionnaires, et rejoindra le puits d'accès de Tima le plus proche, dont seules les parois moulées sont réalisées à ce jour, explique Philippe Laborie, ingénieur travaux (Campenon Bernard TP). Prévue à l'origine à une profondeur moindre de 4 m, la galerie devait être creusée en traditionnel (creusement, injections, creusement, etc.) depuis le puits de Tima. Les impératifs de livraison du DO Bièvre ont radicalement changé la donne. Le creusement s'opérera donc depuis l'amont et au tunnelier, selon un tracé plus profond que prévu initialement. Plus long à mettre en place, le tunnelier permettra au final de travailler plus vite et dans des conditions plus sécurisantes, en réduisant les impacts sur la voirie locale."

■ 1,20 M DE PAROI MOULÉE À "GRIGNOTER"

La machine choisie, baptisée Jupiter, est un tunnelier Lovat à pression de terre, spécialement conçu pour forer des terrains fortement aquifères. Élément historique du parc de Campenon Bernard TP (déjà 7 km de galerie à son actif), entièrement rénové et livré courant juin, il a pu démarrer son creusement le 4 juillet, après l'achèvement de la construction de ses points d'appui.

"Nous avons jusqu'en septembre pour effectuer ce percement, poursuit Philippe Laborie, un délai en principe largement suffisant, puisque nous travaillerons en deux postes."

Particularité du chantier, Jupiter va déboucher au terme de sa course dans un puits qui n'aura pas été terrassé, et il devra forer la paroi moulée sur la totalité de son épaisseur (1,20 m).

"Cette situation n'est pas courante, commente Philippe Laborie, car d'ordinaire, le point d'arrivée est « préparé » pour épargner les dents de la roue de coupe. Pour parvenir à grignoter cette paroi, où les armatures métalliques ont été remplacées par un ferrailage de fibres de verre, nous devons peut-être changer les dents de la roue de coupe, ce qui oblige à pénétrer à l'intérieur de la chambre d'abatage. Pour parer tout risque de venue d'eau dans cette hypothèse, des injections préventives ont été réalisées dans le terrain" (photo 6).

■ A86 OUEST : CHANTIERS DANS UN CHANTIER

Plus important chantier actuel de travaux souterrains en Europe, l'A86 Ouest en Île-de-France, que réalise le groupement Socatop pour le compte de Cofiroute (concessionnaire), va tourner avant 2010 la page d'un dossier ouvert dès les années 1970 : le bouclage de la deuxième rocade de Paris. Celui-ci se fera en deux étapes : fin 2007, mise en service de la section Rueil-Malmaison/échangeur avec l'A13 à Vaucresson (VL1), puis, fin 2009, tronçon A13/Pont Colbert à Versailles (VL2).

Conçu autour de deux priorités – la sécurité et l'environnement –, l'ouvrage illustre un type inédit de tunnel à deux niveaux de circulation unidirectionnels et indépendants, qui seront exclusivement réservés aux véhicules légers. Il est par ailleurs conforme aux exigences de la réglementation sur la sécurité des ouvrages routiers souterrains révisée après la catastrophe du tunnel du Mont-Blanc (circulaire 2000-63 du 25 août 2000) et sera ainsi équipé de 67 espaces de sécurité ou niches, soit 27 niches de désenfumage, aménagées tous les 400 m, et 40 niches de sécurité avec escaliers de transfert, c'est-à-dire des espaces étanches et pressurisés reliant les deux galeries et pouvant servir de refuge pour une centaine de personnes ou de sas d'évacuation. L'ouvrage compte enfin neuf puits de secours, quatre sur VL1, cinq sur VL2, implantés en moyenne tous les 1 000 m, dont la réalisation a été confiée à un groupement conduit par Campenon Bernard TP pour un montant forfaitaire de 75 M€ (cf. *Travaux* n° 820, juin 2005).

■ DES OUVRAGES PROFONDS DE 25 À 87 M

Équipés d'un ascenseur aménagé dans l'espace central et d'un escalier hélicoïdal et destinés à l'intervention des secours depuis la surface, ces puits sont surmontés d'un local technique enterré, coiffé d'un édifice abritant la tête d'ascenseur, la seule partie émergée de l'ouvrage. Ils comprennent, notamment les puits du Butard (VL1) et RD10 (VL2) des équipements de ventilation (apport d'air frais, extraction).

DO BIÈVRE-TIMA

Maître d'ouvrage
SIAAP

Maître d'œuvre
SAP (Service de l'assainissement de Paris)

Entreprise Générale
Groupement Par.En.Ge (Sogea) - GTM
Génie Civil et Services

Entreprise
Campenon Bernard TP (Sogea)

- Longueur de l'ouvrage : 127 m
- Effectif : 19 personnes (travail en deux postes)
- Délai contractuel : 4 mois
- Montant des travaux : 1 600 K€ HT

"A l'exception de ces deux ouvrages qui se distinguent aussi par leur diamètre (respectivement 11 et 40 m au lieu de 7,30 m) et de leur profondeur qui varie de 25 à 87 m, il s'agit d'ouvrages plutôt répétitifs, souligne Patrick Gauthier, directeur travaux (Campenon Bernard TP), car ils sont tous terrassés depuis la surface en faisant appel aux mêmes techniques : paroi moulée quand les couches traversées sont de médiocre qualité ou contiennent de l'eau, soutènement traditionnel dans les parties dures."

Employée sur sept des neuf puits, la paroi moulée est en outre mise en œuvre avec des techniques différentes : benne pour les faibles profondeurs, hydrofraise dans les couches les plus dures – et à certains endroits, la hauteur de la paroi moulée atteint 60 m.

Selon les ouvrages, l'avancement des travaux est très variable. Certains puits de VL1 ont été mis en chantier avant le creusement du tunnel, d'autres beaucoup plus récemment, comme celui du Bois de l'État, qui a démarré en février 2004 et devra être livré avant la fin 2006. Pour les ouvrages de VL2, l'ordre de service a été notifié à Campenon Bernard TP en avril 2004, mais les travaux n'ont véritablement commencé que sur RD10 (paroi moulée et terrassements), car la priorité environnementale du projet se traduit par de longues négociations du maître d'ouvrage avec les riverains, les communes, l'ONF, etc., et les délais de mise à disposition des emprises sont importants. Pour la même raison, ces emprises sont réduites au strict minimum, les itinéraires d'accès sont rigoureusement définis (y compris les jours et les heures) et l'utilisation de camions bennes de 15 t rendue obligatoire en lieu et place des ordinaires semi-remorques.

"En dépit d'une livraison des puits de VL2 prévue à la fin 2008, le vrai compte à rebours du chantier vient de commencer avec le démarrage du creusement à Jouy-en-Josas, juge Patrick Gauthier, car contrairement aux autres puits qui sont indépendants du tunnel principal et lui sont raccordés par un « rameau », le tunnelier débouchera début 2006 au fond du puits RD10, ce qui sous-entend de nombreuses interfaces complexes et la livraison à temps du radier, des longrines de transfert du tunnelier et du « faux tunnel » pour le redémarrage du percement." (photos 7, 8, et 9).

■ UNE TRANCHE SUPPLÉMENTAIRE DE TRAVAUX EN SOUS-SOL

Situées sous la nappe phréatique, les niches 30, 31 et 32, proches de l'échangeur avec l'A13 à Vaucresson, nécessitaient un traitement du terrain pour pouvoir être excavées à partir du tunnel principal. La solution retenue, classique (elle a été utilisée



Photo 8
Les ouvertures des niches ont été réalisées après coup. Des travaux supplémentaires ont dû être réalisés pour trois d'entre elles, situées sous la nappe phréatique

The recess apertures were constructed afterward. Additional works had to be carried out for three of them, located under the water table



Photo 9
Dans le rameau reliant la base du puits de secours au tunnel est aménagée la niche de sécurité à deux niveaux établissant une liaison entre les deux voies de circulation

In the cross-passage linking the base of the emergency shaft to the tunnel is arranged the two-level safety recess establishing a connection between the two traffic lanes

dans les années 1900 dans la construction du métro parisien), consiste à congeler les terrains. Pour réaliser les injections nécessaires sans affecter l'environnement de surface, l'aménagement d'une galerie d'accès provisoire située au-dessus du niveau de la nappe s'est imposé. Cette dernière, les puits à partir duquel elle a été forée ainsi que le creusement d'un rameau de jonction entre la base du puits et le tunnel principal, la future niche 35, ont fait l'objet d'un marché sous-traité par Socatop au groupement Campenon Bernard TP (mandataire), CSM Bessac.



Photo 7
Profonds de 25 à 87 m et d'un diamètre courant de 7,30 m à l'exception de deux d'entre eux, les puits de secours de l'A86 Ouest sont reliés aux voies de circulation par un "rameau", ici en cours de construction, et sont équipés d'un ascenseur et d'un escalier destinés aux interventions de secours depuis la surface

25 to 87 m deep and of standard diameter 7.30 m except for two of them, the emergency shafts of the A86 West are connected to the traffic lanes by a cross-passage, here in the course of construction, and are provided with a lift and a stairway designed for emergency response operations from the surface

Photo 10
 Une galerie d'accès provisoire de 700 m a été creusée à partir d'un puits provisoire lui aussi (le puits 35), afin de congeler le sous-sol et d'aménager les "niches" 30, 31 et 32, situées sous la nappe phréatique

A provisional access gallery 700 m long was dug from a shaft, likewise provisional (shaft 35), so as to freeze the subsoil and develop "recesses" 30, 31 and 32, located under the water table



Photo 11
 À l'extrémité de la galerie provisoire, une excroissance de 15 m, elle aussi revêtue d'un blindage de bois, a dû être creusée manuellement en raison de son fort rayon de courbure

At the end of the provisional gallery, a 15-metre outgrowth, likewise covered with wooden shielding, had to be dug out manually due to its large radius of curvature

PUITS 35 ET GALERIE PROVISOIRE

Maître d'œuvre
 Socatop

Maître d'ouvrage
 Cofiroute

Groupeement sous-traitant
 Campenon Bernard TP (mandataire et pilote technique), CSM Bessac

- Longueur de l'ouvrage : 700 m
- Effectif : 35 personnes (travail en trois postes)
- Délai contractuel : 12 mois
- Montant des travaux : 5,9 M€

► "A l'exception de la niche 35, il s'agit d'ouvrages provisoires qui seront remblayés une fois les injections faites, explique Franck Moine, ingénieur travaux (Campenon Bernard TP), ce qui a notamment déterminé le choix du blindage en bois de la galerie."

LES PUITS DE SOCATOP

Maître d'œuvre
 Socatop

Maître d'ouvrage
 Cofiroute

Groupeement sous-traitant
 Campenon Bernard TP (mandataire et pilote technique), Eiffage TP, GTM Génie Civil et Services, VINCI Construction Grands Projets

- Profondeur des ouvrages : de 25 à 87 m
- Effectif en pointe : 120 personnes
- Délai contractuel : 72 mois (VL1); 62 mois (VL2)
- Montant des travaux : 75 M€

Ouvrages

- Puits de secours : Les Hauts-Bénards, Le Bois de l'État (Rueil-Malmaison); Place Berthet (La Celle-Saint-Cloud); Le Prieuré (Marnes-la-Coquette); Le Carrousel, Viroflay SNCF, Porchefontaine (Versailles)
- Puits de secours et de ventilation : Le Butard (La Celle-Saint-Cloud), RD10 (Viroflay)

Les travaux ont commencé en avril 2004 par le terrassement du puits, profond d'environ 26 m et d'un diamètre de 10 m, qui a dû être chemisé sur une hauteur de 10 m, et l'excavation du rameau de jonction au tunnel principal. Puis le creusement de la galerie a pu commencer, à l'aide d'un tunnelier Bessac de 3,80 m de diamètre (3,50 m fini), équipé d'un bras de pelle mobile sur 360° dans la chambre d'abattage, de six vérins de poussée s'appuyant sur le blindage bois, d'un convoyeur à chaîne pour les déblais et d'un extenseur de cintres. Longue de 700 m, la galerie traverse des sables de Fontainebleau, et le creusement s'est effectué à un rythme quotidien moyen de 20 m (en trois postes pour respecter le délai). Une accroissance de 15 m, au droit de la niche 30 a dû être creusée en traditionnel en raison d'un rayon de courbure excédant les capacités du tunnelier. Le blindage de la voûte s'effectuait par travées de 1,20 m, au fur et à mesure de la progression, par mise en place des cintres en profilés métalliques et des éléments de bois, approvisionnés par fagots et coupés sur mesure pour les passages courbes.

"L'essence utilisée est un douglas de catégorie 2, un bois de charpente venu de Corrèze, précise Franck Moine, et 600 m³ au total ont été utilisés dans la galerie" (photos 10, 11 et 12).



Photo 12

Au pied du puits provisoire 35, à l'abri d'une voûte renforcée par des cintres métalliques, est creusé le rameau où sera aménagée la niche de sécurité 35

At the foot of provisional shaft 35, sheltered by a vault reinforced by metallic arches, is dug the cross-passage where safety recess 35 will be developed

ABSTRACT

Revival of an historic business of Sogea Construction

Various authors

After completing the long works on work section 2 for the Toulouse metro, and while work continues on the emergency shaft on the A86 West in the Ile-de-France region, several projects underway (Lioran tunnel) or about to start up (in Paris and in Besançon) mark the revival of underground works at Sogea Construction (VINCI). With expertise in these techniques, reorganised and determined, the company plans to stabilise its operations in this expanding market at a good level, consolidate its image with regard to safety and environmental policy, and consolidate its position in the select club of five or six recognised specialists in this business.

RESUMEN ESPAÑOL

El renuevo de una actividad histórica de Sogea Construction

Autores diversos

Tras la finalización de la obra maratón del lote 2 del metro de Toulouse, y mientras se proseguían los trabajos de los pozos de emergencia de la autopista A86 Oeste en Ile-de-France, varias operaciones en curso (túnel del Lioran) o a punto de dar comienzo (en París y en Besançon) vienen a señalar el renuevo de los trabajos subterráneos en Sogea construction (VINCI).

Al controlar perfectamente semejantes técnicas, reorganizada y determinada, la empresa se propone consolidar su imagen en términos de seguridad y de política medioambiental y reforzar su posición en el club cerrado de los cinco o seis especialistas reconocidos de la actividad profesional.

Travaux de génie civil de Maurice Lemaire

Le 19 janvier 2004 APRR a notifié au groupement Bouygues TP - Eiffage TP le marché de génie civil de travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire à Sainte-Marie-Aux-Mines en Alsace. Cet ouvrage de 7 km qui relie l'Alsace aux Vosges est le plus long tunnel routier situé intégralement sur le territoire français. Il s'agit du plus gros chantier de mise en sécurité d'un tunnel jamais réalisé en France. La maîtrise d'œuvre a été confiée au groupement Bonnard et Gardel/Scetauroute.

Les travaux consistent essentiellement en la création d'une galerie de sécurité de 6 m de diamètre parallèle au tunnel, l'amélioration des capacités de désenfumage et de ventilation, la réalisation de salles de transit tous les 400 m, de galeries de retournement et de sous-stations électriques, la modernisation et la sécurisation des équipements et de la signalisation, la reprise de l'assainissement et de la chaussée. Le chantier de génie civil mobilisera sur site plus de 350 personnes.

HISTORIQUE ET PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le tunnel Maurice Lemaire a été inauguré en 1937. C'était à l'origine un tunnel ferroviaire. A la suite de la fermeture de la ligne Saint Die - Sélestat il a été transformé en tunnel routier et mis en service dans cette configuration en 1976 à la suite de trois années de travaux qui ont consisté principalement en la réalisation de chaussées et de garages, la mise en place en voûte de caissons de ventilation et la construction de deux usines de ventilation. Suite à l'incendie du 24 mars 1999 dans le tunnel du Mont-Blanc, un diagnostic de l'ensemble des tunnels routiers dont la longueur est supérieure à 1 km est effectué à la demande du gouvernement. Au vu des résultats et des examens complémentaires le tunnel de Sainte-Marie-Aux-Mines est interdit aux poids lourds en mars 2000 et une étude sur la sécurisation est lancée par le concessionnaire : les Autoroutes Paris Rhin Rhône.

L'OBJECTIF DES TRAVAUX ET LES INTERVENANTS

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

- ◆ la construction d'une galerie de sécurité parallèle au tunnel;
- ◆ la mise en place de conduits et gaine de désenfumage;

- ◆ la réalisation de salles de transit pressurisées tous les 400 m;
 - ◆ la modernisation et la sécurisation des équipements et de la signalisation;
 - ◆ la reprise de l'assainissement de la chaussée.
- L'investissement pour les travaux de sécurisation s'élève à 180 M€ financés à hauteur de 145 M€ par le concessionnaire, le reste étant assuré par les collectivités locales et l'Etat. La maîtrise d'œuvre est assurée par le groupement Bonnard & Gardel/Scetauroute.

Le présent article ne concerne que les travaux de génie civil. On se reportera utilement à l'article publié par l'AFTES à l'occasion du congrès de Toulouse en octobre 2002 de MM. André Thiboud (APRR), Michel Mercier (Bonnard & Gardel), Hubert Tournery (Scetauroute) et qui décrit le contexte et la globalité des travaux de sécurisation du tunnel (1). Le marché de génie civil a été notifié au groupement retenu le 19 janvier 2004 avec une période de préparation de trois mois. Le 19 avril 2004, le tunnel Maurice Lemaire est fermé à la circulation. Le jour même les travaux commencent.

DESCRIPTION DES TRAVAUX GÉNIE CIVIL

Le génie civil du chantier de sécurisation du tunnel de Sainte-Marie-Aux-Mines se caractérise par la superposition dans le temps et sur un même espace de plusieurs chantiers de natures différentes :

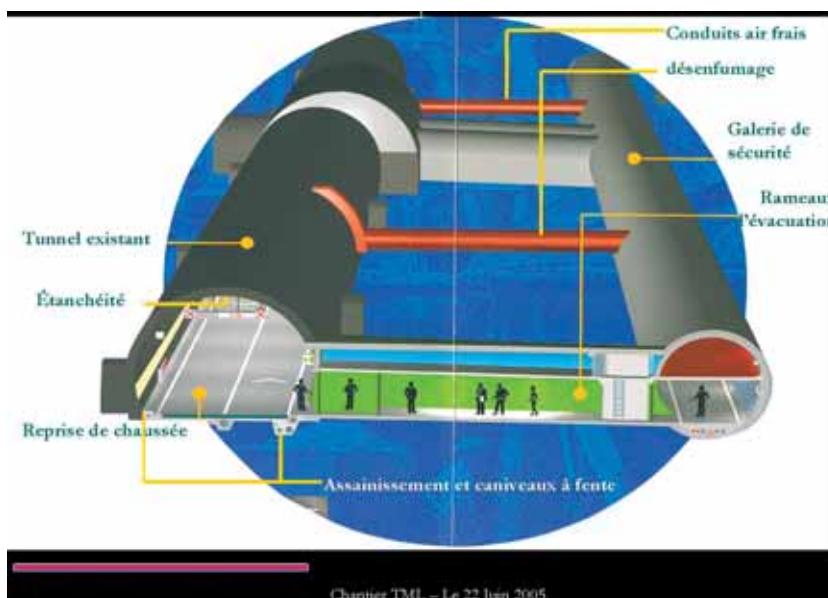
- ◆ le déséquipement du tunnel et la dépose des caissons;
- ◆ le creusement de la galerie de sécurité :
 - une partie en conventionnel,
 - une partie au tunnelier;
- ◆ les revêtements des structures entières de la galerie y compris l'étanchéité;
- ◆ les travaux dans le tunnel existant allant de l'analyse et l'auscultation des structures aux reprises d'assainissement et de chaussée ainsi que de très nombreux ouvrages intertubes;
- ◆ les travaux extérieurs : bassins, assainissement, trémies, remodelage, reprise des usines de ventilation.

Le présent article se limitera à une description succincte de l'opération caissons et présentera les différents modes de creusement retenus.

(1) AFTES - Journées d'études internationales de Toulouse du 21 au 23 octobre 2002 - Rénovation du tunnel routier Maurice Lemaire p. 63 à 67.

Synthèse des travaux à réaliser en souterrain

Summary of work to be performed underground



Chantier TML - Le 22 Juin 2005

sécurisation du tunnel

André Duteil



DIRECTEUR
DE CHANTIER
DU GROUPEMENT
Bouygues TP et Eiffage TP

Bruno Combe



RESPONSABLE
DE PRODUCTION
Groupe Bouygues TP
et Eiffage TP

LE DÉSÉQUIPEMENT ET LA DÉPOSE DES CAISSONS

Dès la fermeture du tunnel existant, le 19 avril 2004, les travaux de déséquipement et de mise en place des réseaux et équipements nécessaires aux travaux ultérieurs ont été lancés. L'enlèvement des réseaux existants a été confié à une entreprise spécialisée, le groupement Bouygues TP/Eiffage TP assurant le reste.

C'est plus de 25 km de conduits métalliques (air comprimé, alimentations en eau, exhaure, etc.) qui ont été posés.

Une installation complète d'éclairage et un réseau électrique de distribution de puissance (câbles, transformateurs, armoires et coffrets) ont été mis en place. Ces travaux ont été réalisés en deux mois.

Pendant ce temps, les études de conception et la fabrication d'outils spécifiques pour la dépose des caissons ont été lancées. Il fallait, en effet, déposer 1 374 caissons en béton pesant 20 t et mesurant 7,00 x 5,00 m accrochés à la voûte de l'ouvrage par des suspentes métalliques et des bracons. L'outil conçu et fabriqué, se compose des deux tables latérales télescopiques qui vont supporter les caissons et permettre la découpe des suspentes et ensuite les déposer sur un porteur motorisé aménagé qui permettra la rotation de 90° des caissons et leur transport jusqu'à l'aire de traitement.

Le groupement a également, durant cette période, aménagé une zone de déchargement, de nettoyage et traitement des eaux, ainsi que le morcellement et le concassage. L'objectif étant de minimiser les déchets et d'optimiser le recyclage (2).

L'ensemble de cette opération a été mené à bien entre juin et décembre 2004.

LES DIFFÉRENTS MODES DE CREUSEMENT

La galerie de sécurité

La galerie de sécurité est parallèle en partie courante, à une distance de 16 m, au tunnel existant. Elle est de section circulaire de 6,00 m de diamètre au creusement dans sa partie centrale (du PM 335 au PM 6558) et de section "Fer à cheval" sur 335 m côté Alsace et 400 m côté Vosges.

(2) Cf. article TOS n° 188 de mars-avril 2005.

Elle traverse des horizons constitués essentiellement de gneiss et de granit de caractéristiques géomécaniques très variables.

Les têtes ont été creusées par des méthodes conventionnelles. Un tunnelier "roche dure" a été fabriqué pour creuser la partie centrale de l'ouvrage.



Travail front
tête Vosges

Work on tunnel face,
Vosges portal

Le creusement conventionnel

A fin juillet 2005, la partie creusement conventionnelle côté Alsace est terminée. La partie conventionnelle côté Vosges est en cours. Le tunnelier est en action sur l'attaque à partir de l'Alsace et a atteint le PM 800 à la mi-juillet. Il ressortira coté Vosges en fin de creusement pour y être démonté et évacué.

Le creusement côté Alsace

Après une préparation du front réalisée indépendamment au préalable, le creusement conventionnel a commencé dès la fermeture du tunnel à la mi-avril 2004. Sur la première partie (150 m) les travaux ont nécessité la réalisation de voûtes parapluies de 15 m de longueur réelle et de 12 m de longueur utile, et la mise en place de soutènements lourds (cintre HEB 160 espacés de 0,80 à 1,50 m) et blocage entre cintres par béton projeté fibré. La stabilité au front a été assurée par des boulons en fibres de verre exécutés en même temps que les voûtes parapluies et par la mise en œuvre de béton projeté à chaque creusement. La répartition et le nombre des boulons au front ont chaque fois été déterminés par la nature du terrain rencontrée (géologie, densité et direction des fissurations...). Les

Berceau démarrage tunnelier
TBM
starting cradle



Tête de coupe du tunnelier "Cynthia"
"Cynthia" TBM cutting head



Vue du tunnelier
View of the tunnel boring machine



voûtes parapluies ont été réalisées par l'entreprise Presspali.

Le creusement a été réalisé, soit à la pelle avec godet ou équipée d'un brise-roche hydraulique (BRH), soit à l'explosif. L'utilisation de l'explosif a été précédée de tirs d'essai avec mesures de vibrations en différents points pour permettre la définition de plans de tirs compatibles avec les contraintes liées à l'environnement du chantier (tunnel existant, habitations et présence de colonies de chauves-souris espèce protégée) pour lesquelles des enregistrements avec analyse des spectres de fréquence ont été réalisés. Les habitations les plus proches sont été équipées de capteurs et chaque tir a été enregistré. Les mesures de vibration ont été réalisées par Idetec.

Après l'excavation, une première passe de béton projeté a été exécutée immédiatement. Le soutènement adapté a ensuite été mis en place et un complément de béton projeté réalisé.

Le marinage a été fait par chargeuses. La section au creusement a été de 45 m² et un béton de radier a été réalisé à l'avancement.

Dès que le terrain l'a autorisé, les voûtes parapluies avec tubes scellés ont été remplacées par des boulons autoforeurs, associés aux cintres HEB dont l'écartement a été adapté à la tenue du terrain. Les cintres ont ensuite été supprimés pour laisser place à un soutènement constitué uniquement de boulons et de béton projeté.

Le front a été arrêté au PM 336 et les aménagements nécessaires à la mise à front du tunnelier ont été réalisés :

- ◆ pose de quatre rails scellés dans le radier en partie courante ;
- ◆ mise en place de profilés pour le ripage à proximité du front ;
- ◆ réalisation d'un berceau circulaire en béton projeté pour permettre l'appui des grippers et le ripage du tunnelier.

Le creusement côté Vosges

Les travaux préparatoires côté Vosges se trouvent inclus dans le marché. Ils consistaient essentiellement à réaliser une tranchée d'accès et la préparation du front. Ces travaux ont nécessité des terrassements importants et un cloutage des parois revêtues de béton projeté et réalisés par passes de 1,75 m.

De plus, il a fallu réaliser des déviations de voirie pour la desserte des riverains pendant la durée du chantier dont un pont provisoire enjambant la trémie d'accès.

L'amenée des différents fluides (eau, électricité, air comprimé, ventilation, exhaure, etc.) ainsi que les ateliers et le magasin ont dû également être réalisés sur l'attaque se trouvant à plus de 7 km des installations principales du chantier.

Une partie de ces travaux a été réalisée durant la période d'hiver et de grands froids du début 2005



Forage conduits
air frais (Mustang)
*Drilling fresh air ducts
(Mustang)*

et a donc subi les intempéries. Les travaux de terrassement ont été réalisés par l'entreprise Transroute de Strasbourg et les tirants et cloutages par la société Stips.

Cette attaque était initialement prévue sur 150 m. Il a été décidé, au vu des caractéristiques des terrains rencontrés et de la probable présence d'une zone géologiquement perturbée, de prolonger cette attaque sur 400 m en conventionnel pour traverser cette zone délicate. En même temps, le tunnelier attaquait le creusement côté Alsace.

Une fois achevés ces travaux préparatoires, des voûtes parapluies et des boulons ont été réalisés et le creusement s'est poursuivi par des méthodes identiques à celles utilisées préalablement côté Alsace.

Le creusement au tunnelier

Compte tenu du contexte géologique et de la longueur de l'ouvrage, il est prévu de réaliser le creusement en partie courante avec un tunnelier "roche dure" à front ouvert de 6 m de diamètre à la tête de coupe.

Le tunnelier doit pouvoir avancer dans les conditions suivantes :

- ◆ creuser en terrain dur (granit et gneiss) ;
- ◆ pouvoir traverser des zones perturbées (failles, zones broyées, décompressées, etc.) ;
- ◆ poser des soutènements provisoires.

L'avancement du tunnelier et du train suiveur est assuré par des vérins de poussée et des grippers qui prennent appui sur la paroi ou sur un revêtement réalisé au préalable si nécessaire, la pression exercée sur la paroi étant de l'ordre de 35 bars.

Ce tunnelier glisse directement sur le rocher dans sa partie avant, soit sur environ 125 m. Après une

zone de 20 m consacrée à la pose des voussoirs de radier, le train suiveur roule sur des rails posés sur ces voussoirs sur une distance de 60 m et les 50 m restant directement sur les voussoirs, la partie centrale des remorques étant libérée pour le roulage des trains de service.

Hormis l'ensemble des remorques portant les installations de logistique (transformateur, centrales hydrauliques, armoires électriques, ventilateurs et dépoussiéreurs, locaux de sécurité, groupe électrogène, enrouleurs et rallongement de supports de bande transporteuse, etc.), le tunnelier est constitué de quatre zones de travail décalées mais chacune nécessaire au bon avancement de l'ensemble.

La tête

Elle est composée d'une roue de coupe équipée de 38 mollettes de 6 m de diamètre, d'une jupe de 5 m de longueur et terminée par un peigne. Cette partie contient les moteurs d'entraînement de la roue d'une puissance de 2 100 kW. Les matériaux extraits de la tête sont évacués par une bande transporteuse de largeur 800 mm et de capacité 500 t/h. Calé sous la jupe, se trouve un érecteur de cintres pour l'assemblage et la mise en place des HEB 140.

Dans cette zone se trouvent également trois perforatrices qui autorisent un soutènement immédiat. Deux d'entre elles mettent en œuvre des boulons semi-radiaux sur les 140° supérieurs et permettent, soit de fixer les cintres en U, soit de clouer des dièdres instables. Si nécessaire, un treillis soudé est intercalé entre les cintres et le terrain dès la sortie de la jupe pour assurer la sécurité du personnel dans cette zone et sur les parties qui suivent, jusqu'à la projection de béton.

Portique conduits
désenfumage

Gantry for smoke
control ducts



Mini Panto
Mini Panto



► La troisième perforatrice exécute des boulons auto-foreurs subhorizontaux pour pouvoir stabiliser un hypothétique mauvais terrain en calotte, entre la sortie de la jupe et la pose du premier cintre. Cette foreuse peut également faire des forages destructifs à l'avancement.

Le soutènement dans cette zone permet la réalisation de différents profils choisis, au fur et à mesure en fonction du terrain rencontré allant du simple boulonnage ponctuel pour stabiliser un dièdre paraissant instable, jusqu'à la pose de cintres HEB avec treillis coffrant et bétonnage entre les ailes de cintre et en calotte, dans les très mauvais terrains, en passant par tous les intermédiaires comme par exemple la pose de profilés en U sur 120° avec treillis et fixés par boulons. L'ensemble des pièces nécessaires au soutènement : profilés, treillis, boulons, plaques, outils, etc. sont approvisionnés par une chaîne de chariots et d'outils de transfert mécanisés depuis les trains de service.

Juste derrière cette zone se trouvent les grippers et les vérins de poussée qui exécutent des strokes de 180 cm. La poussée exercée pouvant atteindre 1 460 t.

Zone de boulonnage L2

A 60 m de la tête de coupe se situe une autre boulonneuse en position axiale. Elle effectue le boulonnage systématique avec essentiellement des boulons scellés au mortier et en position radiale. Dans cette zone, un treillis complémentaire peut être mis en place. L'avancement de cet atelier doit être compatible avec les autres.

La zone de béton projeté

Juste derrière l'atelier décrit ci-dessus se trouve la zone où est projeté le béton par l'intermédiaire d'un robot. La zone d'évolution du robot a été déterminée pour mettre en œuvre les quantités prévues aux différents profils en fonction de la vitesse de creusement correspondant ; ce robot est distant de 75 m du front. Il est donc possible d'avoir un terrain très différent entre la zone en creusement et la zone en bétonnage et donc, des cadences d'avancement différentes. Le béton est fabriqué par une centrale située sur le chantier. Il est transporté jusqu'à la pompe à béton par bennes malaxeuses par les trains de service. Elles sont alors reprises par un système de transfert qui permet un déversement direct dans la pompe à béton qui se trouve située à 110 m en arrière du robot et à 180 m de la zone L1. Il est possible de fabriquer et de projeter du béton fibré et non fibré en fonction des besoins et si nécessaire superposé dans le même cycle.

La pose des voussoirs de radier

La zone de pose des voussoirs nécessite une remorque spécifique "en pont" pour dégager la largeur utile. La longueur nécessaire est déterminée par la durée du cycle nettoyage, pose scellement, pose de rails, etc. confrontée à la vitesse de creusement. Dans notre cas, la remorque se trouve à 135 m du front et a une longueur libre de 17 m. Les voussoirs de radier ont une géométrie prévue pour le passage des drains définitifs. Ils sont de deux types : soit 1,20 m, soit 1,80 m suivant la nature du soutènement qui a dû être mis en place. Chaque voussoir de 1,80 m pèse 4,5 t. Ils sont préfabriqués à l'extérieur du chantier par Bonna Sable.

En conclusion, ce type de tunnelier mêle les problématiques habituelles des tunneliers à pression de terre et à pression de boue et celles liées aux travaux de creusement conventionnels. Ces derniers prennent de l'ampleur dès que la qualité du terrain se dégrade.

La galerie de raccordement

Une galerie de raccordement entre la galerie de sécurité et l'usine de ventilation côté Alsace a également été réalisée par des méthodes comparables à celles utilisées pour les têtes de la galerie traditionnelle :



Front tunnel
salle de transit
*Transit room
tunnel face*

◆ la galerie de sécurité traverse au départ un mur de soutènement existant et elle est creusée dans une zone sensible ayant subi des mouvements. Le mur de soutènement a dû être préalablement conforté et stabilisé. Le chantier a mis en place des mesures de convergence pendant toutes les phases de travaux ;

◆ cette galerie est creusée sous voûtes parapluies, simples dans son premier tronçon et doubles dans le second. Elle est creusée en section divisée avec des cintres à oreilles en demi-supérieure et béton projeté entre les cintres. Ces travaux sont à réaliser dans un espace extrêmement réduit enclavé entre le mur de soutènement et l'usine de ventilation existante.

Les instabilités constatées ont conduit à adapter les solutions initialement prévues et à utiliser les méthodes de travail habituellement mises en œuvre dans les zones urbanisées délicates.

Les galeries intertubes

Entre le tunnel existant et la galerie de sécurité un nombre très important de liaisons sont à réaliser. Elles ont des objectifs et des sections très diverses et sont exécutées par des techniques différentes. Le souci du groupement dans la mise en place des nombreux ateliers simultanés en tunnel a été d'organiser de grandes familles, et de trouver des solutions offrant le maximum de mobilité et de souplesse, afin de pouvoir gérer les problèmes de ventilation, de sécurité et d'accès rapide des secours en cas de nécessité, de logistique et d'approvisionnement des différents ateliers et la

distribution de puissance aux différents postes de travail. La complexité des contraintes a conduit à adopter des horaires différents entre les différents ateliers et à prévoir des méthodes et des matériels mobiles et autonomes.

Les conduits de petit diamètre

Ces conduits peuvent apporter l'air frais en tunnel en cas de nécessité. Ils alimentent également des nombreux appareils situés en tunnel. Le choix a été fait de faire transiter, par la galerie de sécurité, les réseaux d'alimentation et de récolte d'informations pour les sécuriser. Ces conduits intertubes de petit diamètre (204 mm à 237 mm) sont espacés de 25 m pour les airs frais ; ils sont situés à des niveaux différents et sont, bien sûr, à creuser dans des terrains extrêmement variables. Pour ces travaux le groupement a investi dans une foreuse Atlas Copco (modèle Mustang).

Cet atelier a été rendu autonome en lui adjoignant sa source d'énergie indépendante pour lui donner une autonomie complète. Cet atelier travaille à trois postes sur 5 jours par semaine. L'atelier de mise en place des tubages définitifs en acier inox est indépendant du forage.

Les conduits de désenfumage

Espacés de 100 m, ces 68 conduits de 1,50 m de diamètre fini sont revêtus d'un tube en acier protégé par une peinture époxy. Ils sont situés en partie supérieure du tunnel et démarrent dans des carnaux à réaliser dans le revêtement du tunnel existant. La solution initialement prévue utilisait la méthode du Raise Boring. Elle avait pour inconvé-

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maîtrise d'ouvrage

Direction des Investissements et de la Construction des Autoroutes Paris Rhin Rhône

Maîtrise d'œuvre

Groupement Bonnard et Gardel-Sce-tauroute

Travaux de génie civil

Groupement Bouygues TP et Eiffage TP

nient majeur de rejeter tous les déblais dans la galerie en cours de creusement au tunnelier et donc le risque d'en perturber fortement l'avancement. Une solution utilisant la technique du microtunnelier roche dure a ensuite été étudiée.

Le nombre de déplacements (68) pour de faibles longueurs à forer à chaque fois (16 m), ne rendait pas cette approche compétitive en termes de coût et délais. Le groupement a donc décidé d'étudier une solution de creusement à l'explosif. Dans un premier temps des tirs d'essai ont été réalisés dans différents terrains pour s'assurer qu'il n'y avait pas de risque de désordres dans la structure du tunnel, ce qui a été confirmé. Ensuite, il a fallu modifier la section de creusement et trouver des matériels adaptés pour réaliser ces "petites galeries". Ce matériel a été trouvé chez Robofores avec un micropento.

Le groupement a conçu et fait fabriquer deux portiques automoteurs avec rampe d'accès. Ils permettent de travailler simultanément sur plusieurs conduits à la fois et donc de rationaliser les différents postes de travail. Cette solution a surtout le grand intérêt de permettre de concentrer les tirs en tunnel et donc de limiter le nombre d'évacuation du personnel ce qui, sur un ouvrage de 7 km de long, est primordial.

Les autres ouvrages intertubes

Les autres ouvrages intertubes, bien que de sections et de destinations différentes sont réalisés par des méthodes de creusement similaires. Il s'agit des galeries de retournement au nombre de neuf au droit des garages existants, des sous-stations électriques constituées de deux rameaux et au nombre de cinq et de salles de transit espacées de 400 m et au nombre de 16.

Ils sont tous réalisés à partir du tunnel routier et utilisent les méthodes conventionnelles similaires à celles décrites pour les attaques de la galerie. Toutefois, vu leur répartition dans le massif, une grande partie du creusement se fera à l'explosif et le soutènement par boulons et béton projeté. Les ouvrages situés à proximité des têtes pourront être terrassés à la pelle et recevoir un soutènement lourd par cintres HEB. Pour ces ouvrages les avancements sont réalisés simultanément sur plusieurs attaques.

Fin juillet 2005, tous ces travaux étaient lancés et en cours d'exécution.

ABSTRACT

Civil engineering work to improve safety for the Maurice Lemaire tunnel

A. Duteil, Br. Combe

On 19 January 2004, APRR awarded the Bouygues TP/Eiffage TP consortium the civil engineering contract for work to improve safety in the Maurice Lemaire tunnel at Sainte-Marie-Aux-Mines in Alsace. This 7-km structure linking Alsace to the Vosges mountains is the longest road tunnel located entirely on French territory. This is the largest project to improve tunnel safety ever carried out in France. Project management was entrusted to the Bonnard et Gardel/Scetauroute consortium.

The works basically involve creating a safety gallery 6 metres in diameter parallel to the tunnel, improving smoke control and ventilation capacity, building transit rooms every 400 m, and turning galleries and electrical sub-stations. They also include modernisation and safety improvement for appurtenances and signage, and reworking the drainage system and the pavement. The civil engineering project will employ more than 350 people on site.

RESUMEN ESPAÑOL

Trabajos de ingeniería civil de puesta en seguridad del túnel Maurice Lemaire

A. Duteil y Br. Combe

El pasado 19 de enero de 2004, APRR notificó a la agrupación Bouygues TP – Eiffage TP el contrato de ingeniería civil de los trabajos de puesta en seguridad del túnel Maurice Lemaire en Sainte-Marie-Aux-Mines en Alsacia. Esta estructura de 7 km que pone en comunicación Alsacia y los Vosgos constituye el túnel vial más largo situado en su totalidad en el territorio francés. Se trata de la mayor obra de puesta en seguridad de un túnel nunca realizado hasta la fecha en Francia. La dirección técnica fue encargada a la agrupación Bonnard y Garde/Scetauroute.

Las obras consisten principalmente en la creación de una galería de seguridad de 6 metros de diámetro paralela al túnel, la mejora de las capacidades de eliminación de humos y de ventilación, la ejecución de salas de tránsito cada 400 metros, de galerías de

cambio de sentido y de subestaciones eléctricas, la modernización y la protección de los equipos y de la señalización, la refacción del saneamiento y del firme. La obra de ingeniería civil habrá de movilizar en el sitio a más de 350 personas.