

# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**TRAVAUX SOUTERRAINS.** LE TUNNEL DE DRAINAGE HKWDT SUR L'ILE DE HONG KONG. LES TUNNELS DE L'AUTOROUTE A89 EST. ENTRE LOIRE ET RHONE : LE TUNNEL DE VIOLAY, RATP LIGNE 4, LOT T1. CENTRALE HYDROELECTRIQUE DES BOIS EN HAUTE-SAVOIE : TRAVAUX SUITE AU REcul DE LA MER DE GLACE. CSM BESSAC EXPORTE SON SAVOIR-FAIRE

N°875 OCTOBRE 2010



EXPLORATION  
SOUS-GLACIAIRE  
DE LA MER DE GLACE  
© PASCAL TOURNAIRE /  
PHOTOTHÈQUE EDF



Directeur de la publication  
Patrick Bernasconi

Directrice déléguée  
Rédactrice en chef  
Mona Mottot

3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03  
Email : mottotm@fnfp.fr

#### Comité de pilotage

Laurent Boutillon (Vinci Construction Grands Projets), Jean-Bernard Datry (Setec TPI), Philippe Jacquet (Bouygues), Stéphane Monleau (Solétanche Bachy), Bruno Radiguet (Bouygues), Claude Servant (Eiffage TP), Philippe Vion (Systra), Jean-Marc Tanis (Egis), Michel Duviard (Egis), Florent Imbert (Razel), Mona Mottot (FNTP)

#### Ont collaboré à ce numéro

Rédaction  
Marc Montagnon,  
Monique Trancart  
Secrétariat de rédaction  
Julia Deck

#### Service Abonnement et Vente Com et Com

Service Abonnement TRAVAUX  
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot  
92350 Le Plessis-Robinson  
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22  
Fax : +33 (0)1 40 94 22 32  
Email : revue-travaux@cometcom.fr

France (10 numéros) : 190 € TTC  
International (10 numéros) : 240 €  
Enseignants (10 numéros) : 75 €  
Étudiants (10 numéros) : 50 €  
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)  
Multi-abonnement : prix dégressifs  
(nous consulter)

#### Publicité

Régie Publicité Industrielle  
Xavier Bertrand - Nourredine Bennai  
9, bd Mendès France  
77600 Bussy-Saint-Georges  
Tél. : +33 (0)1 60 94 22 27  
Email : bertrand@rpi.fr - bennai@rpi.fr

Site internet : [www.revue-travaux.com](http://www.revue-travaux.com)

#### Réalisation et impression

Com'1 évidence  
8, rue Jean Goujon - 75008 Paris  
Tél. : +33 (0)1 40 74 64 34  
Email : contact@com1evidence.com

#### Maquette

##### Idé Edition

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright bu Travaux). Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957, qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Editions Science et Industrie SAS  
9, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n°0111 T 80259  
ISSN 0041-1906

# POUR UNE VILLE PROFONDE



© DR

Les Débats publics sur les réseaux de transport du Grand Paris et de l'Île-de-France s'ouvrent sur fond de développement durable qui induit mixité des fonctions, sobriété foncière, gestion raisonnée des ressources de la ville et sonne l'arrêt de l'étalement urbain. Dans une ville qui se densifie, l'utilisation du sous-sol comme réserve d'espace retrouve une pertinence.

Or si ingénieries et entreprises possèdent une parfaite maîtrise technique du sous-sol – les articles de ce numéro en attestent –, il n'en va pas de même pour ceux qui conçoivent la ville : décideurs et aménageurs affichent pour le sous-sol une retenue que l'ignorance du potentiel offert par cet espace explique tout autant que le manque de visibilité, d'évaluation et de méthode établie pour l'appréhender utilement. Pourtant le sous-sol est capable d'améliorer la qualité de la vie urbaine, de contribuer au fonctionnement d'une ville dense et fluide en assurant une cohabitation verticale de fonctions urbaines qu'on ne peut continuer à rejeter en périphérie.

Il agrandit l'espace public à l'instar du Grand Louvre qui, parce que vaste et relié à l'espace urbain par de multiples chemins, prouve qu'une ville profonde peut gagner en attrait.

Cette conviction, l'AFTES<sup>1</sup> l'explore et a décidé avec le CESR<sup>2</sup> d'Ile-de-France d'en faire un enjeu public : le colloque qu'ils ont organisé le 9 juin à Paris ouvre la voie.

Il s'agit d'apprendre à utiliser le sous-sol dans toutes ses composantes, à le respecter, l'organiser, le faire aimer. Culture nouvelle qui nécessite de nouveaux outils afin de rendre l'espace souterrain économiquement rentable dans une gestion environnementale pérenne.

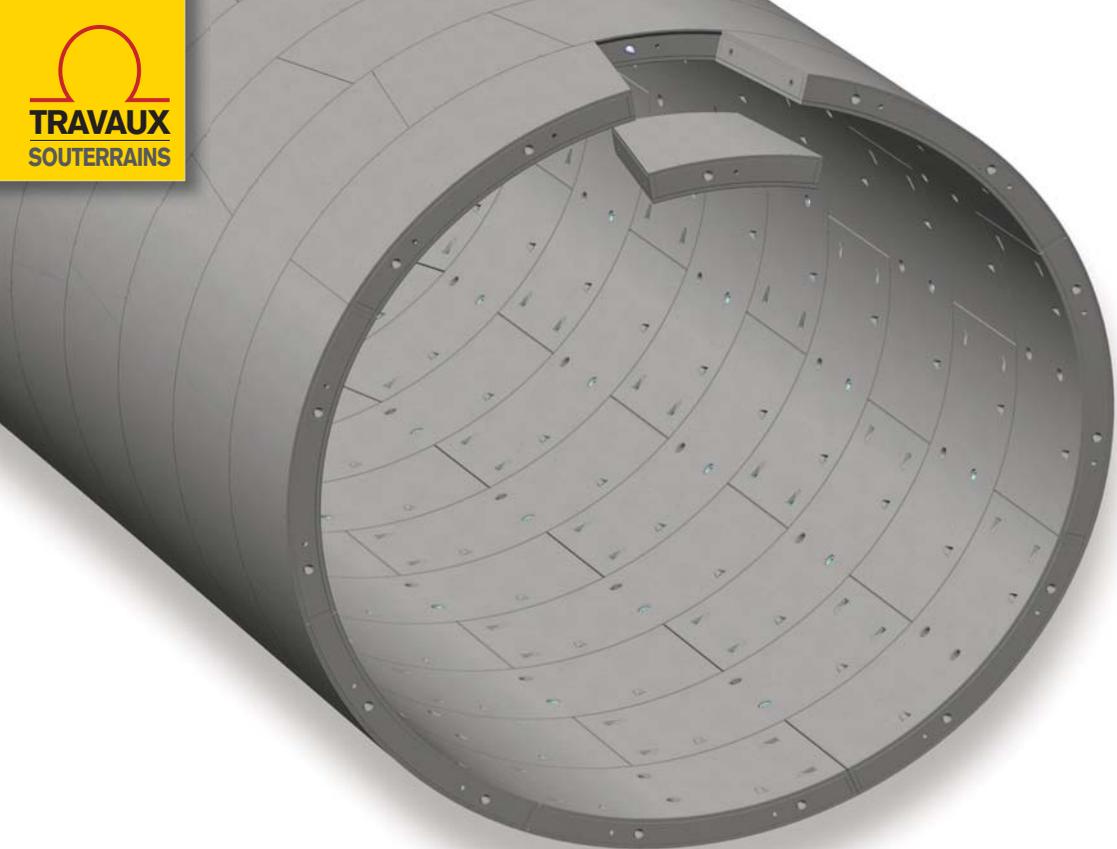
Double défi de l'AFTES et de son Comité Espace souterrain : faire connaître le potentiel offert par le sous-sol, désormais reconnu dans le SDRIF<sup>3</sup> comme «ressource stratégique de la ville», en participant aux débats publics à venir, et mettre en œuvre sur le long terme, avec l'appui du MEEDDM<sup>4</sup>, un Projet national de Recherche pour outiller les aménageurs ; celui-ci alliera recherche théorique et expérimentation sur sites réels avec des acteurs institutionnels et économiques identifiés.

Car c'est bien de la capacité qu'auront les décideurs à développer un esprit prospectif, riche d'une vision globale et anticipatrice de l'aménagement du sous-sol, que naîtront des projets d'une ampleur nouvelle et prometteuse !

- 1 - AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain.
- 2 - CESR : Conseil économique et social de la Région.
- 3 - SDRIF : Schéma directeur d'Aménagement de l'Île-de-France.
- 4 - MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.

**MONIQUE LABBÉ**  
ARCHITECTE DPLG  
PRÉSIDENTE DU COMITÉ ESPACE SOUTERRAIN  
VICE-PRÉSIDENTE DE L'A.F.T.E.S.

LISTE DES ANNONCEURS : ATLAS COPCO, 2<sup>e</sup> DE COUVERTURE - ARAMINE, P9 - ARCADIS, P10 - SOTRES, P12 - ROBIT ROCKTOOLS, P13 - SOTRALENTZ CONSTRUCTION, P15 - SYSTRA, P16 - ALPHAROC, P17 - CNETP, P18 - CONDAT, P19 - IHC EQUIPEMENTS ET SERVICES, P20 - IDETEC, P21 - SPIE FONDATIONS, P22 - ATC BTP INDUSTRIE, P25 - PUBLI-RÉDACTIONNEL SPRETEC, P26 - MIRE, P27 - AFTES, P30 - FAYAT PÔLE FONDATIONS, P31 - SEMA, P32 - SPRETEC, P33 - SPIE BATIGNOLLES, P34 - SMABTP, P53 - PRO BTP, 3<sup>e</sup> DE COUVERTURE - SOLETANCHE BACHY, 4<sup>e</sup> DE COUVERTURE



1- Vue 3D partiellement éclatée d'un revêtement de tunnel avec des anneaux constitués de voussoirs préfabriqués.

# MÉTHODE DE MISE EN ŒUVRE ET MOULE ADAPTÉ À LA PRÉFABRICATION DE VOUSSOIRS DE TUNNEL EN BÉTON AUTOPLAÇANT

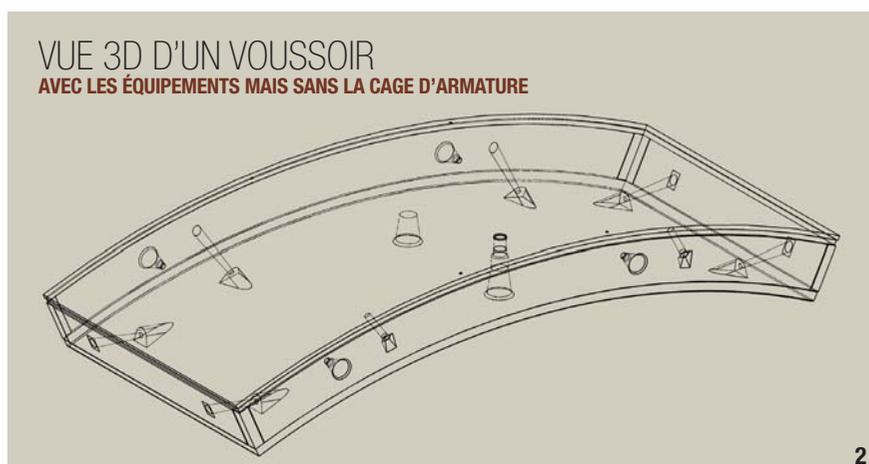
AUTEURS : LUC RICHARD-HULIN, PIERRE-EDOUARD DENIS, FRANÇOIS PETIT, LAURENT BOUTILLON, LIONEL LINGER, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - DIDIER LEFEBVRE, CBE GROUP

EN UNE DÉCENNIE, L'UTILISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS (BAP) DANS L'INDUSTRIE DE LA PRÉFABRICATION S'EST D'ABORD DÉMOCRATISÉE PUIS S'EST MASSIVEMENT GÉNÉRALISÉE, AU POINT DE DEVENIR MAJORITAIRE DANS CERTAINS PAYS, NOTAMMENT AUX ÉTATS-UNIS. CECI EST DÛ À AU MOINS TROIS RAISONS : LA FACILITÉ DE MISE EN ŒUVRE DU BÉTON, LA QUALITÉ DES PAREMENTS OBTENUS ET LA DIMINUTION DRASTIQUE DE LA POLLUTION SONORE DU FAIT QU'IL N'EST PLUS NÉCESSAIRE DE VIBRER LES BÉTONS. PAR CONTRE IL EST UN DOMAINE DE LA PRÉFABRICATION JUSQUE-LÀ TRÈS PEU CONCERNÉ PAR CETTE VAGUE : IL S'AGIT DE LA PRÉFABRICATION DES VOUSSOIRS DE REVÊTEMENT DE TUNNEL.

## MAIS COMMENT PRÉFABRIQUER DES VOUSSOIRS COMPLEXES EN BAP AYANT LA PRÉCISION GÉOMÉTRIQUE REQUISE POUR CE TYPE DE PRODUITS ?

Les tunnels creusés au tunnelier sont stabilisés par un revêtement constitué d'une succession d'anneaux en béton eux-mêmes composés de plusieurs éléments préfabriqués courbes appelés voussoirs (photo 1).

Ces anneaux supportent les poussées du sol, garantissent l'étanchéité à l'eau et, lors de la construction, transmettent longitudinalement la poussée du tun-

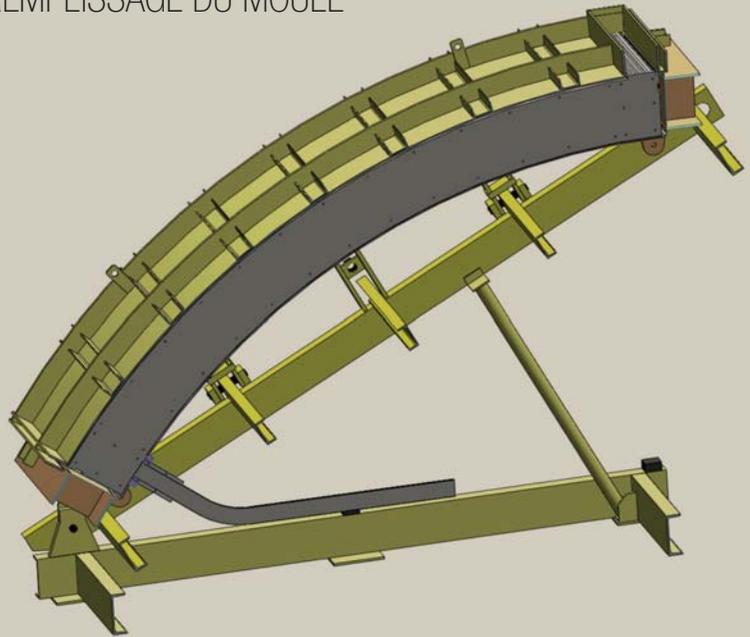


VUE 3D D'UN VOUSSOIR AVEC LES ÉQUIPEMENTS MAIS SANS LA CAGE D'ARMATURE

2- Vue 3D d'un voussoir avec les équipements mais sans la cage d'armature.



## REPLISSAGE DU MOULE



**3- Moule prototype en position de bétonnage – on distingue sur la photo le point d'injection du béton ainsi que deux fenêtres en plexiglas (prototype uniquement) permettant de visualiser le remplissage du béton.**

**4- Remplissage du moule.**

**5- Moule prototype en cours de descente pour le passage de la position bétonnage à la position durcissement.**

méthodologie classique requiert la mise en œuvre d'une « hyper vibration » réalisée par vibreurs externes.

Outre une très violente pollution acoustique, cette opération provoque un vieillissement accéléré des moules : perte des tolérances, déformations et fissurations nécessitant une surveillance permanente et une maintenance très importante.

Par ailleurs, les opérations de finition de l'extrados des voussoirs nécessitent un travail pénible effectué par du personnel qualifié.

Dans ces conditions, la mise en œuvre de béton autoplaçant pour réaliser les voussoirs de tunnels constitue une solution particulièrement intéressante.

Reste toutefois à mettre au point des formulations et un principe de moule permettant un remplissage parfait d'une forme complexe tout en garantissant une géométrie, des parements impeccables et une très grande cadence de fabrication.

### UN CONCEPT INNOVANT

Si quelques voussoirs de tunnels ont déjà été fabriqués en béton autoplaçant, les solutions mises en œuvre n'ont pas donné entière satisfaction.

C'est la raison pour laquelle VINCI Construction Grands Projets, en association avec CBE Group, leader mondial dans la fabrication de moules pour voussoirs de tunnel, ont combiné leur expérience pour développer et valider un concept innovant de moule de

lier qui peut, pour les tunnels de grand diamètre, atteindre plusieurs milliers de tonnes.

La transmission de ces charges s'effectue par les contacts béton/béton entre les faces latérales des voussoirs.

Afin de garantir une uniformité des charges le long des centaines de kilomètres de joints entre voussoirs, il est absolument nécessaire d'avoir un contact parfait entre les faces en regard, ce qui requiert des tolérances géométriques tout à fait exceptionnelles dans le monde de la préfabrication puisque de l'ordre de quelques 1/10° de mm sur le produit fini.

### CONCILIER LA QUALITÉ DU PAREMENT DES FACES LATÉRALES ET LES CADENCES DE FABRICATION

Pour obtenir ces tolérances sur des voussoirs de géométrie complexe (correspondant grosso modo à un trapèze découpé dans un cylindre avec face rayonnante), les moules doivent être très rigides, usinés avec une tolérance extrême et surtout doté d'une mécanique robuste et précise permettant de décoffrer des faces latérales (qui accueillent une rainures pour les joints d'étanchéité) puis de retrouver les tolérances initiales une fois le coffrage

refermé. Afin d'optimiser les coûts de préfabrication et de suivre les cadences de pose des anneaux, l'usine de préfabrication doit généralement travailler par postes. La cadence de production d'une chaîne de préfabrication peut atteindre un voussoir toutes les 12 minutes, chaque moule pouvant être réutilisé jusqu'à 3 fois par période de 24 heures.

Cette cadence est traditionnellement obtenue en remplissant le moule avec un béton très ferme (de type S1) combiné à un étuvage adapté autorisant un décoffrage à 6 h.

Pour obtenir une qualité impeccable du parement des faces latérales, cette

voussoirs utilisant du béton auto-plaçant et des équipements spécifiques de mise en œuvre.

L'idée consiste à réaliser un moule fermé sur ses 6 faces offrant 2 positions successives de travail :

→ Une position quasi-verticale adaptée à l'injection du béton auto-plaçant par la partie basse de l'intrados du moule, et au remplissage progressif du moule jusqu'à une ouverture située au point haut. Celle-ci permet d'évacuer le trop plein et est refermée hermétiquement après bétonnage. (photo 3 et figure 4).

→ Une position horizontale pour la phase de durcissement, adaptée aux translations dans l'enceinte d'une usine classique et au passage dans les étuves existantes. Dans cette position, les déformations du moule sont pleinement maîtrisées car l'appui du moule est parfaitement plan et les poussées du béton frais sont minimales et symétriques, ce qui permet de garantir les tolérances géométriques (photo 5).

#### DES ESSAIS RÉUSSIS

Un prototype en vraie grandeur a été réalisé en 2009, afin de tester le comportement du moule, la méthodologie de

mise en œuvre ainsi que les formules de béton utilisées pour l'ensemble des conditions classiques de réalisation de voussoirs de tunnel à savoir :

→ Béton auto-plaçant et densité d'armature habituelle (~ 100 kg/m<sup>3</sup>)

→ Béton auto-plaçant et densité locale armature très élevée (> 200 kg/m<sup>3</sup>) avec localement au voisinage des faces latérales, 3 lits de frettes espacés de 60 mm et à la maille de 75 x 75 mm.

→ Béton auto-plaçant avec fibres de polypropylène et densité d'armatures standard et très élevée

→ Béton auto-plaçant avec fibres métalliques (40 kg/m<sup>3</sup>) sans armatures.

L'ensemble des essais a donné des résultats particulièrement satisfaisants (photo 6) avec un remplissage parfait et un parement des faces latérales particulièrement lisses et sans bullage, ce qui valide complètement le procédé et permet d'envisager dès à présent une mise en œuvre industrielle, sans nécessiter de modification importante des usines de préfabrication existantes.

Une demande de brevet a été déposée conjointement par VINCI Construction Grands Projets et par CBE Group pour protéger cet outil. □



6- Détail du parement obtenu dans un angle.

ASSOCIATION FRANÇAISE  
DES TUNNELIERS ET DE  
L'ESPACE SOUTERRAIN

*Underground spaces for tomorrow*  
*Opere sotterranee del futuro*  
*El espacio subterráneo del futuro*  
*O espaço subterrâneo do amanhã*  
*Unterirdische Räume der Zukunft*  
*Ondergrondse Ruimte van de Toekomst*  
*未来的地下空间*

# CONGRÈS INTERNATIONAL

## ESPACES SOUTERRAINS de demain

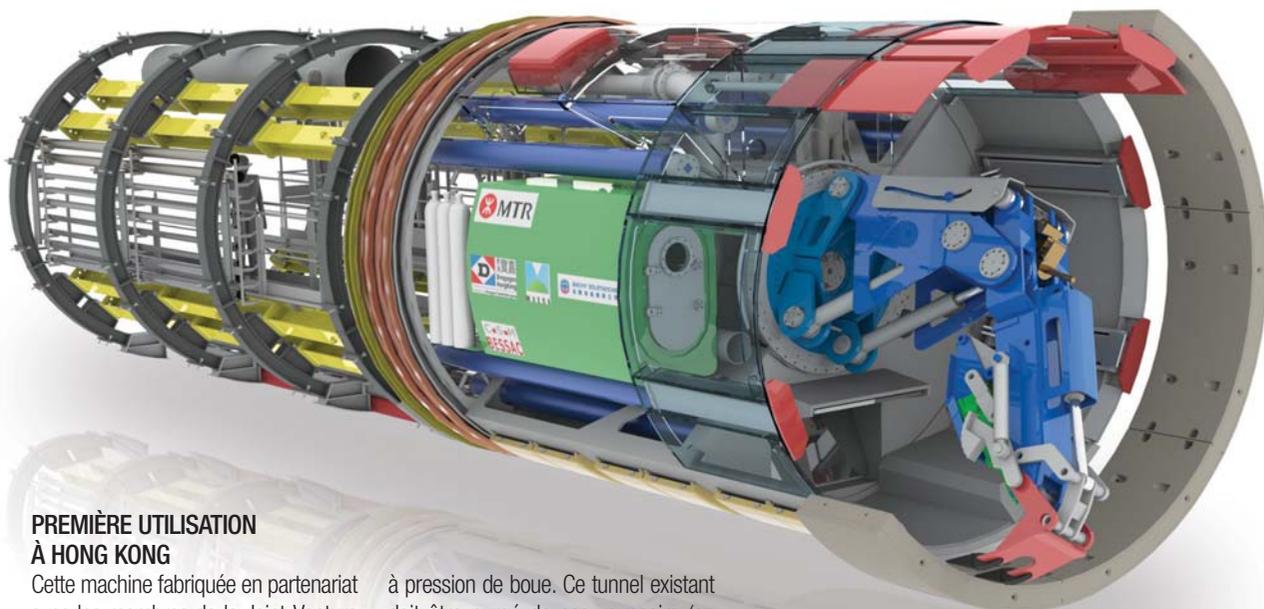
# LYON

# 17 18 19 OCTOBRE 2011

[www.aftes.asso.fr](http://www.aftes.asso.fr)

# UNE MACHINE POUR DÉMONTAGE DE TUNNELS

NOUS CONNAISSONS BIEN JUSQU'À PRÉSENT LES TUNNELIERS, CES MACHINES DESTINÉES À LA CONSTRUCTION DE TUNNELS. ON LES APPELLE AUSSI TBM POUR « TUNNEL BORING MACHINE » EN ANGLAIS. CSM BESSAC, CONSTRUCTEUR DE TUNNELIERS, EST EN TRAIN DE CONCEVOIR ET DE CONSTRUIRE UN TDM POUR « TUNNEL DISMANTLING MACHINE », C'EST-À-DIRE UNE MACHINE À DÉMONTÉ LES TUNNELS.



Vue 3D de la machine à démonter les tunnels : TDM pour « Tunnel Dismantling Machine ».

## PREMIÈRE UTILISATION À HONG KONG

Cette machine fabriquée en partenariat avec les membres de la Joint-Venture Dragage / Maeda / Bachy Soletanche Group et le client MTR, sera utilisée à Hong Kong dans le cadre de l'extension vers l'ouest de la ligne de métro « Island Line », un marché auquel participe CSM Bessac au travers de Solétanche Bachy.

Outre la construction de 4 tunnels de 5,30 m de diamètre, le projet comprend le démontage d'un tunnel d'arrière gare sur lequel devra se raccorder le nouveau tunnel construit par un tunnelier

à pression de boue. Ce tunnel existant doit être purgé de ses voussoirs (en béton armé et en fonte) et rempli de béton maigre, ceci sur une longueur de 130 mètres environ.

## UNE OPÉRATION DIFFICILE EN SITE URBAIN

Cette opération est complexe, au regard du contexte environnemental avec une forte densité de tours et de gratte-ciel au-dessus du tunnel, et surtout du contexte géologique, des alluvions sous une charge d'eau de près de

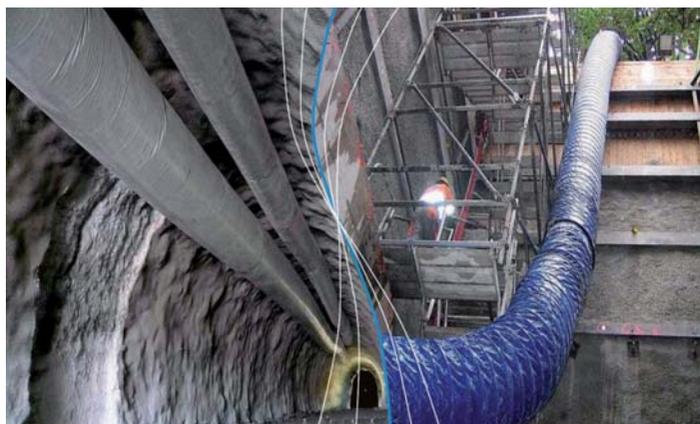
30 mètres. De plus la machine devra accéder au tunnel par un puits de très faibles dimensions.

Cette machine sera donc transportée et assemblée dans le tunnel à démolir. Elle sera fixée dans celui-ci et permettra la mise sous pression d'air (3 bars) de la partie à démolir, qui sera isolée de la partie à conserver par un masque. Un bras assurera le découpage et le démontage des voussoirs, il les placera

dans un sac pour leur évacuation dans la partie arrière non confinée. Un robot de projection remplacera la structure du tunnel démontée par une couche de béton projeté.

Puis le tunnel sera rempli de béton au fur et à mesure de la progression du démontage.

Un beau challenge pour les équipes du constructeur toulousain. □



## DEPOUSSIERAGE / VENTILATION / DESENFUMAGE

**SEMA, fabricant français de ventubes souples d'aération, de dépoussiérage et de désenfumage.**

**Ventubes Type F**, plats, pour le soufflage diamètres jusqu'à 3000 mm longueurs jusqu'à 100 mètres.

**Ventubes Type S**, armés, pour l'aspiration et le soufflage diamètres jusqu'à 1800 mm longueurs jusqu'à 20 mètres.

Nous proposons études, conseils, conception et réalisation pour vos projets de réseaux de ventilation et d'extraction de poussière.

**SEMA**  
9 rue de Lens  
92000 NANTERRE  
Tél. : 01.47.81.95.21  
Fax : 01.46.49.05.26  
hotline@sema-france.com



[www.sema-france.com](http://www.sema-france.com)

# TRAVAUX À PROXIMITÉ DE RÉSEAUX. PROJET DE RÉFORME RÉGLEMENTAIRE DR/DICT<sup>1</sup> : LE POINT DE VUE DE LA FNTTP



DANS UN PRÉCÉDENT NUMÉRO DE LA REVUE TRAVAUX (N°865 - OCTOBRE 2009), BERNARD RIETHMÜLLER, RESPONSABLE DU GROUPE DR/DICT DE LA COMMISSION DES MARCHÉS DE LA FNTTP ET PRÉSIDENT DE L'OBSERVATOIRE NATIONAL DR/DICT, RAPPELAIT LES MULTIPLES INITIATIVES PRISES DEPUIS LONGTEMPS PAR LA FNTTP POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ LORS DES TRAVAUX À PROXIMITÉ DES RÉSEAUX, PRÉOCCUPATION MAJEURE ET CONSTANTE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS DONT LES 250 000 COLLABORATEURS SONT QUOTIDIENNEMENT ET DIRECTEMENT EXPOSÉS AUX RISQUES.

AU MOMENT DES ARBITRAGES QUI SONT EN COURS SUR LA VASTE RÉFORME RÉGLEMENTAIRE ENGAGÉE PAR LES POUVOIRS PUBLICS DEPUIS ENVIRON DEUX ANS, L'AUTEUR FAIT UN POINT DE SITUATION SUR LES DERNIERS PROJETS DE TEXTES PORTÉS À SA CONNAISSANCE ET EXPRIME UNE FOIS ENCORE AVEC VIGUEUR LE DÉSACCORD PROFOND DE LA PROFESSION SUR CERTAINES DISPOSITIONS QUI NE PRENNENT PAS SUFFISAMMENT EN COMPTE DES DEMANDES ESSENTIELLES DE CELLE-CI. BERNARD RIETHMÜLLER, RESPONSABLE DU GROUPE DR/DICT DE LA COMMISSION DES MARCHÉS DE LA FNTTP

Au nom des 65 000 entreprises et des 1 100 000 salariés qu'ils représentent, les Présidents de la FNTTP et de la FFB ont, conjointement, renouvelé en juillet dernier auprès du Ministre d'État, Ministre de l'Écologie, du Développement Durable et de la Mer, leur opposition la plus ferme à l'adoption, en leur état actuel, des projets de textes réformant la réglementation relative à la sécurité des travaux à proximité des réseaux existants.

## DES AVANCÉES ACQUISES IMPORTANTES MAIS...

Nous nous réjouissons bien entendu de l'instauration prochaine d'un « guichet unique », site internet officiel d'accès gratuit dont nous demandons la création pour permettre à tous les déclarants d'éviter toute erreur ou tout manque quant aux exploitants de réseaux auxquels il leur faut adresser leurs déclarations (les « DR » pour les maîtres d'ouvrages, et les « DICT » pour les entreprises de travaux). Nous prenons acte également avec satisfaction de certains autres progrès que devrait apporter la nouvelle réglementation, pour autant qu'elle soit convenablement appliquée (par exemple, le droit pour l'entreprise, en cas de découverte d'une situation imprévue présentant des risques pour la sécurité, d'arrêter ses travaux sans en subir de conséquences).



La complexité des réseaux souterrains est une source de risques en cas de travaux.

considérablement, et rapidement, la sécurité.

## DE LA NÉCESSITÉ DE LOCALISER EN AMONT DES TRAVAUX LES RÉSEAUX EXISTANTS

Comment, en effet, établir de bons projets, puis assurer une saine mise en concurrence des entreprises, puis faire réaliser les travaux en sécurité, si l'on ne connaît pas précisément l'emplacement des réseaux existants ?

Peut-on nier l'évidence que la sécurité se gagne d'abord en amont des travaux, et qu'elle impose une égale implication des trois familles d'acteurs que sont les maîtres d'ouvrages (avec leurs concepteurs et leurs maîtres d'œuvre), les exploitants de réseaux, et les entreprises exécutant les travaux ?

Enfin, n'est-il pas utile de rappeler, par exemple, qu'aujourd'hui encore 90 % des projets ne font pas l'objet des « DR » pourtant imposées par la réglementation en vigueur depuis 1991 ? Et que pratiquement aucun branchement de quelque réseau que ce soit, même dangereux, ne figure encore sur les plans communiqués par leurs exploitants en réponse aux « DR » et « DICT » qu'ils reçoivent, alors que les branchements sont à l'origine de 80 % des incidents et accidents ?! □

## ... ENCORE DES POINTS DIVERGENTS

Nous soulignons certains désaccords majeurs. D'une part, en raison de l'excès manifeste d'un ensemble de nouvelles contraintes très formalistes que les entreprises, particulièrement les PME, mais aussi beaucoup de maîtres d'ouvrages et de maîtres d'œuvre comme de « petits » exploitants de réseaux, ne pourraient manifestement pas satisfaire. D'autre part et surtout, en raison du fait que ces projets de textes, au fil de leurs versions successives, ont désormais perdu de vue l'objectif premier d'une plus grande sécurité, en particulier celle de nos collaborateurs... qui sont pourtant les premiers exposés !

Un consensus avait vite été atteint, au début de la démarche lancée en mars 2008 par les pouvoirs publics, sur la nécessité de rendre obligatoire, lors

de l'élaboration de tout projet public ou privé, la localisation précise dans les trois dimensions des réseaux souterrains existants, y compris les branchements, et l'insertion de ces données dans les dossiers de consultation des entreprises.

Ce principe essentiel devait être la « clef de voûte » de la réforme réglementaire. Il devait conduire les maîtres d'ouvrage à faire effectuer des investigations complémentaires lorsque les plans des réseaux existants n'existent pas ou sont insuffisamment précis. Or, il n'a cessé de faire l'objet de dérogations successives plus importantes les unes que les autres, au point d'être aujourd'hui pratiquement vidé de sa substance et de ne plus concerner qu'une bien trop faible part des ouvrages souterrains concernés. Cela, nous ne pouvons pas l'accepter, car ce serait abandonner, de fait, la seule voie efficace pour améliorer

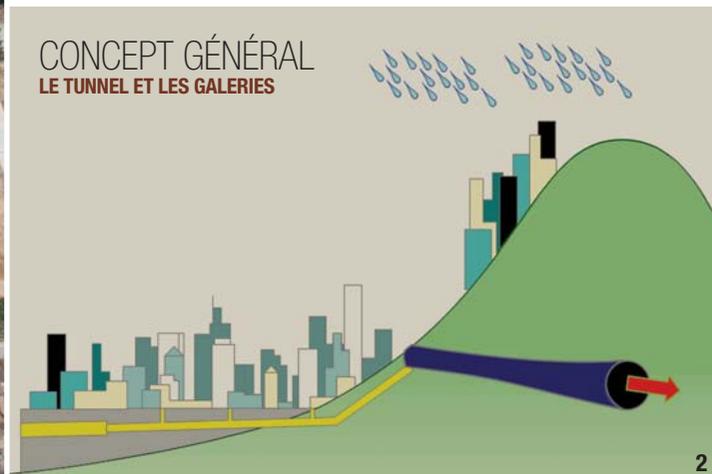
1 - DR/DICT : Demande de Renseignements / Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux.



# LE TUNNEL DE DRAINAGE HKWDT SUR L'ÎLE DE HONG KONG

AUTEURS : MARIE AUBRIT-CLOCHARD, INGÉNIEUR PRINCIPAL ETUDES TUNNEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - PHILIPPE AUTUORI, DIRECTEUR ETUDES TUNNEL, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - DANIEL ALTIER, DIRECTEUR DE PROJET, DRAGAGES HONG KONG - BENJAMIN KITZIS, RESPONSABLE MÉTHODES, DRAGAGES HONG KONG

AFIN DE LUTTER CONTRE DES INONDATIONS FRÉQUENTES, LE PROJET HONG KONG WEST DRAINAGE TUNNEL (HKWDT) VISE À AMÉLIORER LE DRAINAGE DES EAUX D'ORAGE DU NORD DE L'ÎLE DE HONG KONG VERS LA MER. LES TRAVAUX COMPRENNENT LA RÉALISATION D'UN TUNNEL DE 10,5 KM, 8,6 KM DE GALERIES ET 32 PUIITS D'INTERCEPTION DES EAUX PLUVIALES. LE TUNNEL DE DRAINAGE CONSTITUE LE PLUS LONG DE L'ÎLE, AVEC LE PLUS GRAND NOMBRE DE GALERIES D'ACCÈS EXCAVÉES SIMULTANÉMENT AU MOYEN D'EXPLOSIFS. PAR AILLEURS, UNE MÉTHODE ORIGINALE DE FORAGE BAPTISÉE RAISE BORING, HABITUELLEMENT UTILISÉE DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE, A ÉTÉ ADOPTÉE POUR LA RÉALISATION DE CERTAINS PUIITS.



## LUTTER CONTRE LES INONDATIONS

Le Hong Kong west drainage tunnel (HKWDT) est un tunnel de 10,5 km de long qui permet de remédier aux problèmes récurrents d'inondation rencontrés sur l'île de Hong Kong, en particulier lors des passages de typhons. Les eaux d'orage sont collectées sur les hauteurs de l'île puis dirigées par l'intermédiaire de 32 puits vers le tunnel principal de drainage. Ce dernier rejette ensuite les eaux à la mer, à l'Ouest de l'île, au lieu-dit Cyberport. La conception et la construction du projet ont été confiées au groupement composé de Dragages Hong Kong (filiale de Bouygues construction) et Nishimatsu. La fin des travaux est prévue pour 2012.

Le tunnel traverse l'île d'Est en Ouest, de Tai Hang road à Cyberport, à une profondeur allant jusqu'à 300 m. Il est composé de deux tronçons creusés à

l'aide de deux tunneliers de diamètre d'excavation 7,2 m et 8,3 m. Le premier tronçon, d'une longueur de 4 km et d'un diamètre intérieur fini de 6,25 m, part du portail est situé à Tai Hang road pour rejoindre la caverne W0, localisée au centre de l'île de Hong Kong. Le second, d'une longueur de 6,5 km et d'un diamètre intérieur fini de 7,25 m, part du portail Ouest à Cyberport pour rejoindre lui aussi la caverne W0. Les 32 puits de collecte des eaux d'orage à la surface de l'île ont été stratégiquement positionnés le long du tunnel pour intercepter les drainages existants (tuyaux enterrés, caniveaux, rivières naturelles). D'un diamètre de 1,50 à 2,30 m et d'une profondeur de 16 à 175 m, ils sont connectés aux 32 galeries par des chambres d'amortissement de l'eau. Ils sont réalisés par une méthode de forage en remontant communément appelée raise boring. Les 32 galeries,

**1- Le portail Ouest.**

**2- Concept général : le tunnel et les galeries.**

**3- Vue générale du projet : Cyberport-Tai Hang road, le tunnel et les galeries.**

**1- The western portal.**

**2- General concept: the tunnel and galleries.**

**3- General view of the project: Cyberport-Tai Hang road, the tunnel and galleries.**

d'une longueur de 20 à 800 m et d'une largeur moyenne de 2,5 m, en forme de fer à cheval, sont excavées au moyen d'explosifs et par méthode traditionnelle. (Figures 2 et 3).

## CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

La géologie traversée est de type rocheuse, majoritairement volcanique à l'Ouest et granitique à l'Est de l'île. La difficulté de ce projet réside dans la présence de nombreuses failles sur le tracé, de matériaux plus ou moins dégradés et de venues d'eau importantes. La fracturation est variable tout au long du tracé, pouvant causer la chute de dièdres de taille importante (jusqu'à 2 m). En parallèle, un rocher très dur de résistance en compression supérieure à 300 MPa peut être rencontré. Les couvertures de terrain sont également hétérogènes (de 10 à 300 m). (Figure 5).



### CHOIX DES MACHINES

La majeure partie du tracé étant un terrain de roche dure, le choix des machines s'est orienté vers un bouclier de type mixte constitué d'une jupe télescopique permettant simultanément le creusement et la pose du revêtement.

En présence de terrains de bonne qualité, la machine s'appuie radialement sur la paroi du tunnel creusé par un système de gripeur ou patin d'appuis. Cette technique permet des avancements importants en dissociant la mise en place des voussoirs du cycle d'excavation.

L'avance de la machine se fait en trois étapes :

→ Gripage de la partie arrière du bouclier (corps gripeur), c'est-à-dire prise d'appui sur la paroi creusée ;

→ Abattage du terrain par la tête de coupe (progression de la partie avant du bouclier par télescopage) et pose du revêtement au fur et à mesure de la progression de l'excavation ;

→ Lorsque la longueur maximale de télescopage est atteinte, prise d'appui de la partie avant du bouclier sur le revêtement arrière à l'aide de vérins, déverrouillage des vérins (grippeurs) et rétraction de la partie arrière du bouclier (cette étape permet également de tracter le train suiveur) avec retour à la position initiale du bouclier.

### UNE CADENCE D'AVANCEMENT TRÈS VARIABLE

En présence de terrains de qualité médiocre, l'appui des grippeurs sur le terrain ne peut garantir un bon blocage de la machine. La poussée du tunnelier se fait alors par l'intermédiaire des

vérins arrière s'appuyant directement sur les voussoirs. La cadence d'avancement est très variable du fait de la très grande hétérogénéité de la roche : elle va de 40-50 mm/min dans un terrain fracturé à 0,25 mm/min dans le rocher sain.

Les deux machines O Shin à l'Ouest et Nuwa à l'Est sont de fabrication Herrenknecht. Elles offrent des diamètres de coupe de 7,2 et 8,3 m pour un poids d'environ 1 600 t chacune. L'abattage de la roche se fait au moyen de molettes disposées sur la tête de coupe, qui pèse à elle seule environ 160 t. De plus, équipées d'un dispositif de forage au travers du bouclier, les machines sont capables de répondre efficacement aux problèmes de venues

d'eau excessives à front en permettant la réalisation d'auréoles d'injection à l'avancement. Elles sont composées d'un bouclier d'environ 9 m de long et d'un train suiveur d'une longueur totale de 180 m. Depuis le démarrage des deux tunneliers en mars et mai 2009, les machines ont creusé en moyenne 115 m par semaine (photos 6 et 7).

L'évacuation des matériaux est assurée depuis le front jusqu'au niveau des portails par bandes convoyeuses.

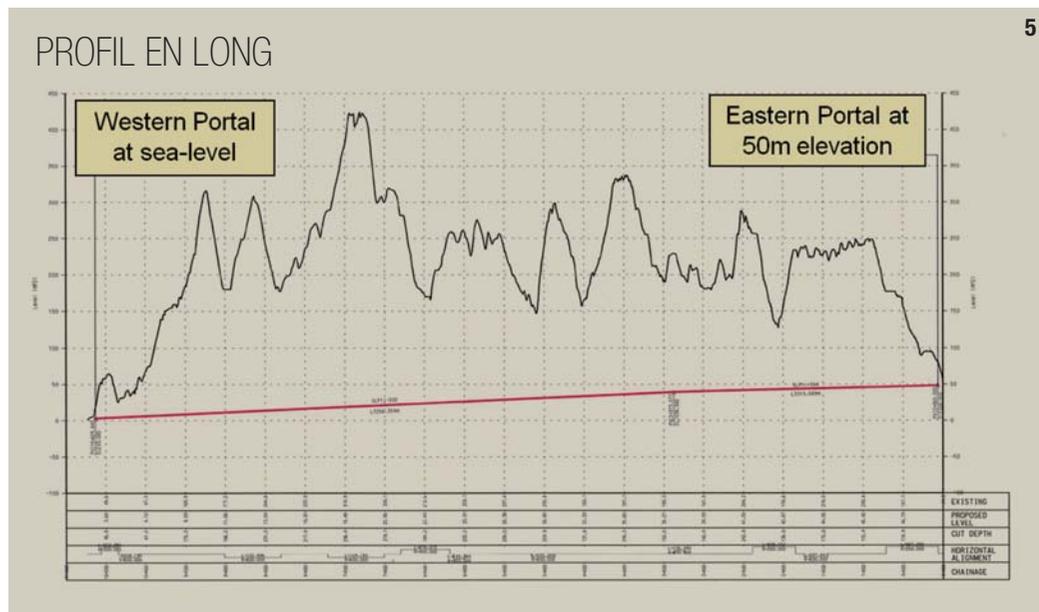
L'étroitesse des lieux au niveau des portails a nécessité une étude très détaillée des méthodes de construction afin d'assurer une logistique sans faille des convois entrant et sortant du tunnel. Il a notamment été nécessaire d'organiser le transport régulier des matériaux excavés par camion du portail Est vers le portail Ouest, où sont effectuées les évacuations par barges vers une zone de stockage en Chine. L'exiguïté des lieux et la longueur des machines a également nécessité la réalisation de deux galeries traditionnelles d'accès pour le montage des tunneliers à chaque portail. (Photo 4).

**4- Le portail Ouest.**

**5- Profil en long.**

**4- The western portal.**

**5- Longitudinal profile.**





### UN REVÊTEMENT ORIGINAL

Pour répondre aux exigences du projet, liées en particulier aux conditions d'hydrogéologie du massif, le revêtement du tunnel est de type drainé.

Sa conception est étroitement liée à celle de la machine, notamment vis-à-vis de la cinématique de montage des anneaux, qui doit permettre d'assurer à

tout moment sa stabilité. Le revêtement est ainsi composé d'anneaux drainés d'une longueur de 1,50 m.

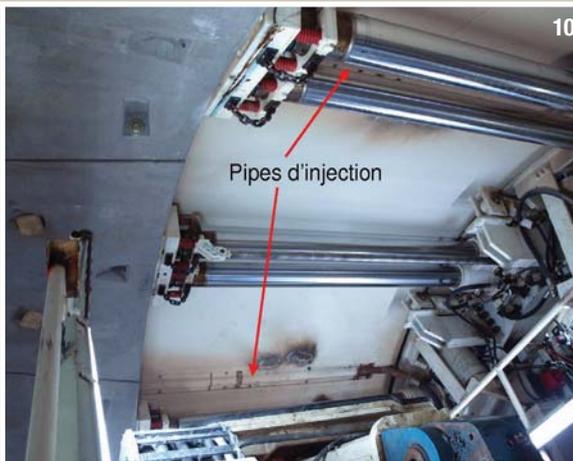
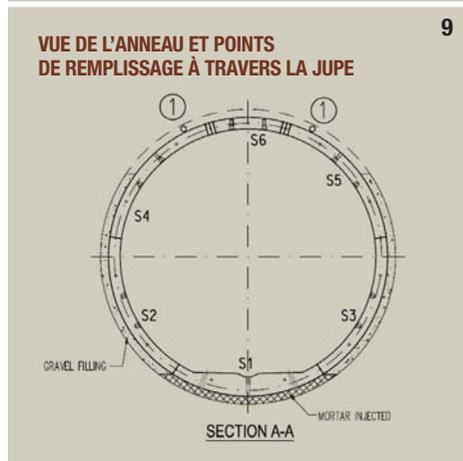
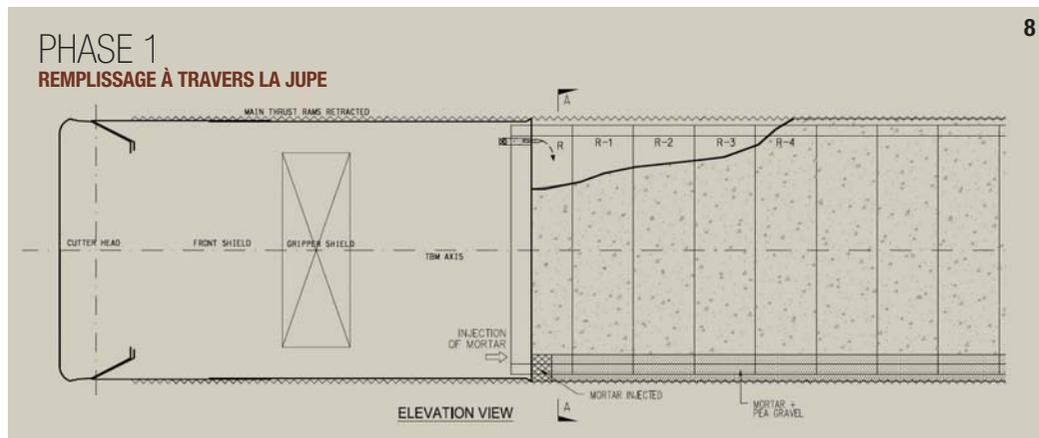
Chaque anneau est lui-même composé de six voussoirs préfabriqués dont le plus petit, la clé, est situé en partie haute.

La plate-forme définitive située en radier du tunnel est intégrée au voussoir

situé en partie basse, et réalisée à la préfabrication du voussoir.

Pour s'adapter aux courbures horizontales du tracé (rayon minimum de 300 m), deux anneaux biais sont définis : l'un droit et l'un gauche. L'épaisseur des voussoirs est de 310 mm pour le tunnel de diamètre intérieur 7,25 m et de 285 mm pour le tunnel de diamètre

intérieur 6,25 m. Le remplissage du vide annulaire entre le terrain excavé et les voussoirs se fait par l'injection d'un matériau drainant (gravette) tout autour de l'anneau, à l'exception de la partie basse (sous le voussoir de radier), où une injection de mortier permet de mieux garantir le remplissage (risque de défaut d'écoulement de la gravette) ▷



6- La machine à l'Ouest.

7- La machine à l'Est.

8- Phase 1 – remplissage à travers la jupe.

9- Phase 1 – vue de l'anneau et points de remplissage à travers la jupe.

10- Pipes d'injection à travers la jupe.

6- The western machine.

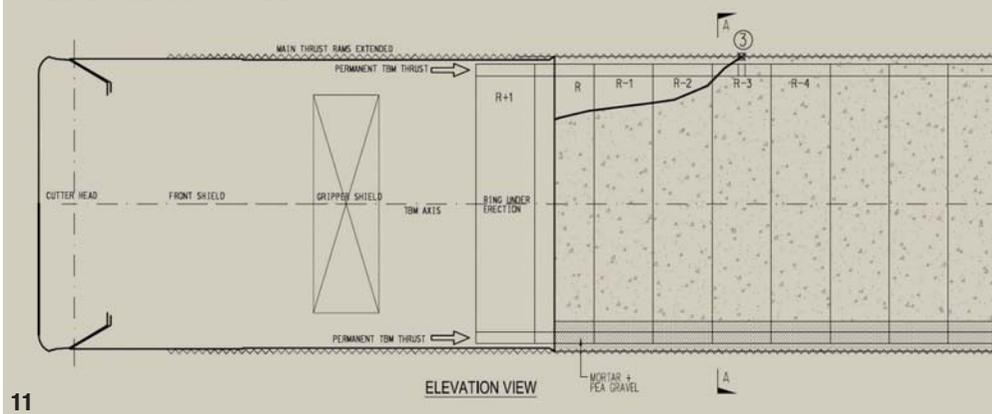
7- The eastern machine.

8- Phase 1 – Filling through the skirt.

9- Phase 1 – View of the ring and filling points through the skirt.

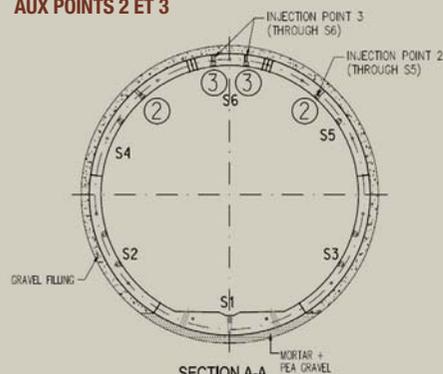
10- Pipes for injection through the skirt.

**PHASE 2**  
**REMPLEISSAGE AUX POINTS 2 ET 3**



11

**PHASE 2**  
**VUE DE L'ANNEAU ET REMPLISSAGE**  
**AUX POINTS 2 ET 3**



12

et d'éviter tout tassement sur le long terme. Les eaux drainées circulent alors de l'extérieur de l'anneau jusqu'à sa partie basse (à l'interface avec le mortier), où elles traversent les joints des voussoirs puis sont récupérées dans le collecteur situé dans la plate-forme définitive du radier.

La principale innovation sur ce revêtement réside dans la séquence de mise en place du matériau drainant et le développement spécifique de la machine afin d'améliorer la stabilité en phase temporaire et les tolérances de mise en place des voussoirs. La solution technique est inspirée des machines en mode dit fermé, où un confinement radial assure la stabilité de l'anneau dès la sortie de la jupe. Des pipes d'injection de gravette sont intégrées à la jupe (point 1) afin de permettre un remplissage au plus tôt de la gravette (70 % de la section) et du mortier avant

le regrippage (phase 1, figures 8, 9 et photo 10). En complément, les voussoirs sont munis d'orifices (points 2 et 3) afin de permettre l'injection de la gravette depuis le train suiveur du tunnelier (phase 2, figures 11 et 12).

Pendant ces phases, les vérins de poussée prennent appui longitudinalement afin de garantir leur stabilité pendant le regrippage. Une procédure spécifique a été définie pour assurer une pression minimale constante sur les voussoirs.

**EXCAVATIONS SIMULTANÉES**  
**DES GALERIES**

Une fois le tunnel avancé, il devient possible de commencer l'excavation des galeries. Les travaux de la première galerie ont débuté en décembre 2009 au puits E5A. Une première passe de 7 m en excavation traditionnelle a été réalisée avant l'excavation par explosifs

**11- Phase 2 – remplissage aux points 2 et 3.**

**12- Phase 2 – vue de l'anneau et remplissage aux points 2 et 3.**

**13- Vue d'une galerie.**

**11- Phase 2 – Filling at points 2 and 3.**  
**12- Phase 2 – View of the ring and filling at points 2 and 3.**

**13- View of a gallery.**

pour des raisons de sécurité vis-à-vis du tunnel. De même, il est convenu de ne pas utiliser les explosifs si les tunneliers sont à une distance inférieure à 200 m des galeries. Les cadences moyennes d'avancement pour l'excavation de ces galeries sont de l'ordre de 3 m par jour. Mais le plus inédit reste le nombre d'excavations simultanées qui atteindra, en pic, 12 galeries à partir du tunnel Ouest et quatre galeries à partir du tunnel Est. (Photo 13).

**CREUSEMENT**  
**DES PUIITS D'ACCÈS**

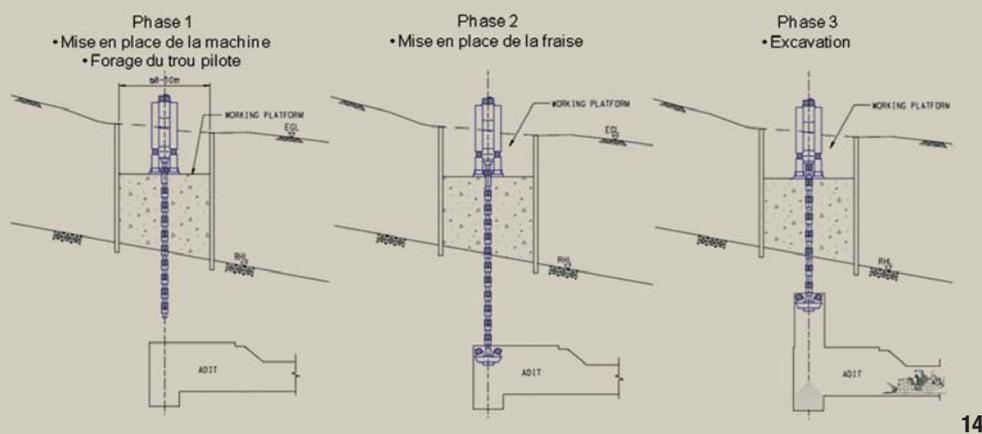
Chaque puits de collecte des eaux d'orage a ses spécificités en termes d'accès et de contraintes liées à l'environnement, à la sécurité et aux conditions géologiques.

L'étroitesse des lieux a guidé le choix des méthodes de construction et des équipements. Pour ces raisons, les

13



## SÉQUENCE DE RAISE BORING



puits sont réalisés avec différentes solutions techniques.

Quelques puits peu profonds (jusqu'à 40 m) sont creusés par des techniques traditionnelles (palplanches, parois en pieux sécants). Cependant, la majeure partie des puits (23 sur 32) est réalisée par une méthode peu utilisée en travaux publics de forage par alésage montant, le raise boring. Quatre machines de raise boring seront utilisées sur ce projet, ce qui constitue une première à Hong Kong. Cette technique requiert un forage initial d'un petit diamètre (300 mm) réalisé à partir de la surface et jusqu'à son intersection avec la galerie. Une fois le trou « pilote » réalisé, une tête de coupe est amenée par le tunnel principal et la galerie au fond du puits, puis elle est connectée à la tige de forage, permettant, à partir de la galerie et jusqu'à la surface, par pression contre la paroi rocheuse,

d'élargir le trou aux dimensions finales du puits. Le forage de ce trou, qui sert de guide vertical au dispositif d'excavation, est l'un des points critiques du projet. Sa réalisation doit être réalisée avec précaution, notamment pour les puits de grande profondeur, afin d'éviter toute déviation lors d'un changement de formation géologique et de garantir la position finale du puits. Avec cette technique, du fait du sens ascendant de l'alésage, le marirage des déblais est réalisé depuis les galeries de connexion puis évacué par le tunnel principal vers les portails, évitant ainsi les problèmes environnementaux à la surface. La première machine, installée depuis juin 2010, a une taille moyenne de 1,4 m (l) x 2,5 m (L) x 4,2 m (H) pour un poids 18,6 t. La vitesse de creusement moyenne est d'environ 0,5 m par heure, avec des diamètres de forage de puits respectifs de 2 441 mm et

**14- Séquence de raise boring.**  
**15- Machine de raise boring.**

**14- Raise boring sequence.**  
**15- Raise boring machine.**

3 154 mm. Le revêtement définitif des puits est réalisé à l'aide de viroles préfabriquées en béton armé. Chaque virole est elle-même composée de voussoirs préfabriqués. Elles sont réalisées par couple de deux, empilées les unes sur les autres et scellées au terrain au fur et à mesure. (Figure 14 et photo 15). □

## FICHE TECHNIQUE

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Drainage service department, Gouvernement de Hong Kong

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Arup & Partners Hong Kong

**ENTREPRISES :** Groupement Dragages Hong Kong - Nishimatsu

**ÉTUDES :** Aecom

**COÛT DES TRAVAUX :** 2.75 milliards HK\$ (environ 266 M€)

**DURÉE DES TRAVAUX :** 49 mois, de 2007 à 2012

## ABSTRACT

### THE HKWDT DRAINAGE TUNNEL ON HONG KONG ISLAND

MARIE AUBRIT-CLOCHARD, BOUYGUES - PHILIPPE AUTUORI, BOUYGUES - DANIEL ALTIER - BENJAMIN KITZIS

**In order to control frequent floods, the Hong Kong West Drainage Tunnel (HKWDT) project aims to improve the drainage of stormwater from the north of Hong Kong Island to the sea. The works involve the construction of a 10.5 km tunnel, 8.6 km of galleries and 32 rainwater interception shafts. The drainage tunnel is the longest on the island, with the largest number of access tunnels excavated simultaneously by explosives. Moreover, an original boring method called raise boring, customarily used in the mining industry, has been adopted for the construction of some shafts. □**

### TÚNEL DE DRENAJE HKWDT EN LA ISLA DE HONG KONG

MARIE AUBRIT-CLOCHARD, BOUYGUES - PHILIPPE AUTUORI, BOUYGUES - DANIEL ALTIER - BENJAMIN KITZIS

**Con objeto de luchar contra las frecuentes inundaciones, el proyecto Hong Kong west drainage tunnel (HKWDT) se propone mejorar el drenaje hacia el mar de las aguas de tormentas procedentes del norte de la isla de Hong Kong. Los trabajos incluyen la ejecución de un túnel de 10,5 kilómetros, 8,6 kilómetros de galerías y 32 pozos de intercepción de las aguas pluviales. El túnel de drenaje constituye la obra más larga de la isla, y cuenta con el mayor número de galerías de acceso excavadas simultáneamente por medio de explosivos. Por otra parte, se ha adoptado para la realización de ciertos pozos un método original de perforación denominado raise boring, que se emplea normalmente en la industria minera. □**

# LES TUNNELS DE L'AUTOROUTE A89 EST

AUTEURS : JEAN-JACQUES LAGAZE, ASF, DIRECTEUR D'OPÉRATION A89 - XAVIER RICHER DE FORGES, ASF, DIRECTEUR D'OPÉRATION ADJOINT A89 - HUBERT TOURNERY, EGIS TUNNELS, DIRECTEUR - FRÉDÉRIC BULTEL, EGIS TUNNELS, DIRECTEUR DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL A89

**LE PROJET AUTOROUTIER A89 EST, LONG DE 50 KM ENTRE BALBIGNY ET LA TOUR DE SALVAGNY, COMPREND TROIS TUNNELS SUR UN LINÉAIRE DE 15 KM : LE TUNNEL DE VIOLAY (4 KM), LE TUNNEL DE LA BUSSIÈRE (1 KM), ET LE TUNNEL DE CHALOSSET (0,7 KM). DE NOMBREUSES CONTRAINTES, NOTAMMENT ENVIRONNEMENTALES, ONT DÛ ÊTRE INTÉGRÉES AFIN DE LIMITER L'IMPACT SUR LES RIVERAINS ET DE PRÉSERVER LE MILIEU NATUREL. PAR AILLEURS, LES OBJECTIFS EN TERMES DE PLANIFICATION CONDUISENT, SUR UN SECTEUR TRÈS LIMITÉ, À UNE ACTIVITÉ EXCEPTIONNELLE DE TRAVAUX SOUTERRAINS, AVEC HUIT FRONTS D'ATTAQUE SIMULTANÉS EN PHASE DE CREUSEMENT EN 2010 ET 11 COFFRAGES-OUTILS DE SECTION COURANTE EN 2011 POUR LA RÉALISATION DU BÉTON DE REVÊTEMENT DES QUELQUE 12 KM DE TUBE.**

## TRAVERSER LES MONTS DU LYONNAIS

La section Balbigny (42)-La Tour de Salvagny (69) constitue le dernier tronçon de l'autoroute A89 qui reliera à terme Lyon à Bordeaux. Longue d'environ 50 km, cette section comprend, dans sa partie centrale, la traversée des monts du Lyonnais, où sont situés les tunnels de Violay, de La Bussière et de Chalosset (figure 2).

Ce tronçon autoroutier fait partie du réseau routier transeuropéen (RTE) au sens de l'article R118-4 du code de la voirie routière. Le trafic, estimé à l'ouverture à environ 20 000 véhicules par jour en trafic moyen journalier annuel (TMJA), a conduit à prévoir une configuration bitube avec des chaussées unidirectionnelles pour les trois tunnels de l'A89. L'itinéraire sera

autorisé au transit des marchandises dangereuses (TMD). Le taux moyen de poids lourds est estimé à environ 15 % du TMJA.

Compte tenu du relief et de la proximité de l'agglomération de Tarare, le tracé autoroutier au droit des trois tunnels présente une géométrie montagnaise avec des courbures importantes et des pentes élevées, jusqu'à 6 % entre Tarare et le tunnel de Violay. Dans ce secteur, la vitesse sera donc limitée à 110 km/h (figure 3). Les tunnels présentent les caractéristiques principales suivantes :

→ Tunnel de Violay : longueur de 3 900 m environ, pente unique de 0,7 % d'Ouest en Est et couverture maximale de 240 m environ ;

→ Tunnel de La Bussière : longueur de 1 020 m environ, pente comprise entre



0,6 % et 1,5 % d'Est en Ouest et couverture maximale de 150 m environ ;

→ Tunnel de Chalosset : longueur de 710 m environ, pente de 1,1 % d'Ouest en Est et couverture maximale de 90 m environ.

## PROFIL EN TRAVERS

La coupe transversale présentée sur la figure 4 est identique pour les trois tunnels, avec une configuration bitube, une hauteur libre de 4,75 m, une largeur roulable de 8,50 m dont deux voies de 3,50 m chacune et deux trottoirs de 1 m environ. La surface excavée est de 90 m<sup>2</sup> environ et la section utile de 63 m<sup>2</sup> environ.

Sous chaque trottoir, on a classiquement prévu des réseaux secs pour l'alimentation des équipements et des réseaux humides pour recueillir, de manière

indépendante, les eaux du massif et de la chaussée.

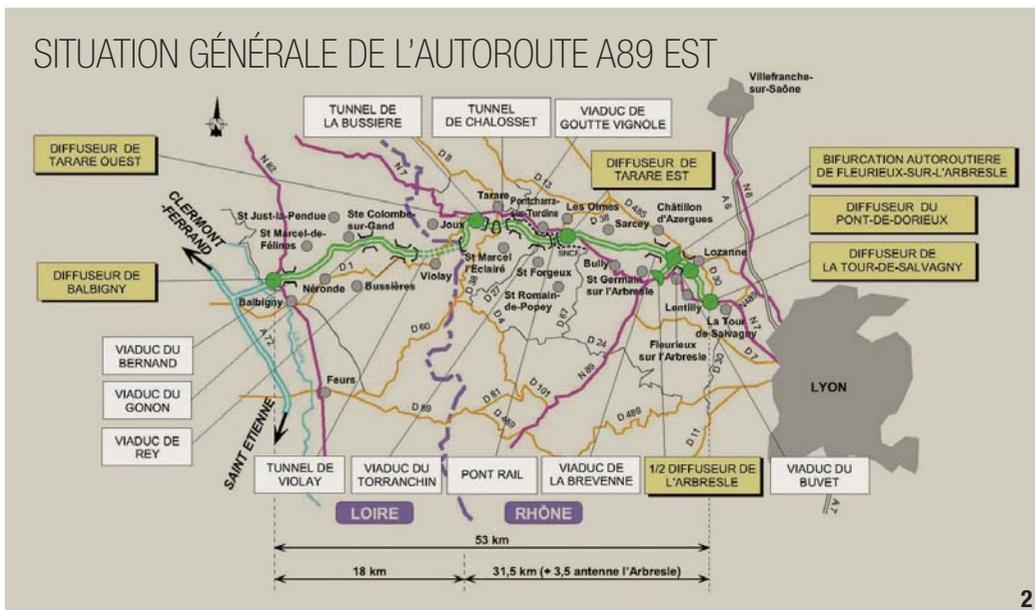
Les eaux de chaussée se déversent dans le caniveau à fente selon une pente transversale de 2,5 % et sont dirigées, via un regard siphonoïde et un collecteur béton, vers un bassin de rétention situé en point bas près d'une tête. Les eaux claires du massif sont recueillies derrière l'étanchéité.

Les trois tunnels comprennent également les divers ouvrages en souterrain et à l'air libre suivants :

→ Des ouvrages intertubes ou by-pass destinés à l'évacuation des usagers, dont un sur deux sert également aux véhicules de secours. Pour le tunnel de Violay, ASF a retenu une interdistance entre ces by-pass de 300 m pour favoriser l'évacuation des usagers compte tenu de la longueur de l'ouvrage, de la



1



2

1- Tunnel de Chalosset.  
2- Situation générale de l'autoroute A89 Est.

1- Chalosset West tunnel.  
2- General location of the A89 East motorway.

présence de TMD et des rampes importantes au niveau des accès (jusqu'à 6 % à l'Est du tunnel) ;  
→ Des niches de sécurité et des niches incendie réparties tous les 150 m ;  
→ Des locaux techniques aux têtes de tunnel et une sous-station en souterrain ▷

pour le tunnel de Violay compte tenu de la longueur de l'ouvrage ;

→ Des casquettes remblayées pour reconstituer le terrain naturel, à l'exception de la tête Est du tunnel de Violay où, compte tenu de la hauteur des talus de section courante, on a prévu un mur tympan architectural et un mur anti-recyclage (photos 5 et 6).

**CARACTÉRISER LE TERRAIN**

Une campagne de reconnaissances géologique et géotechnique a été réalisée en 2006 et 2007 par la société Cofor durant la phase d'études. Sur les trois tunnels, plus de 5 000 ml de sondages ont été effectués avec principalement des sondages carottés et des essais en laboratoire pour caractériser au

mieux le terrain rencontré. Sur le tunnel de Violay, les reconnaissances ont concerné surtout les têtes de tunnel et la faille du Gantet, principale difficulté du massif. Pour les tunnels de La Bussière et de Chalosset, en revanche, la campagne comprenait des sondages aux têtes de tunnel et un sondage carotté horizontal depuis chacune des

têtes de tunnel pour reconnaître quasiment tout le linéaire.

Sur le tunnel de La Bussière, des sondages inclinés à 45° ont également été réalisés transversalement dans la partie Est afin de reconnaître les failles parallèles à l'ouvrage.

Ces reconnaissances ont permis d'évaluer la répartition prévisionnelle des trois

VUE EN PLAN DES TUNNELS

3



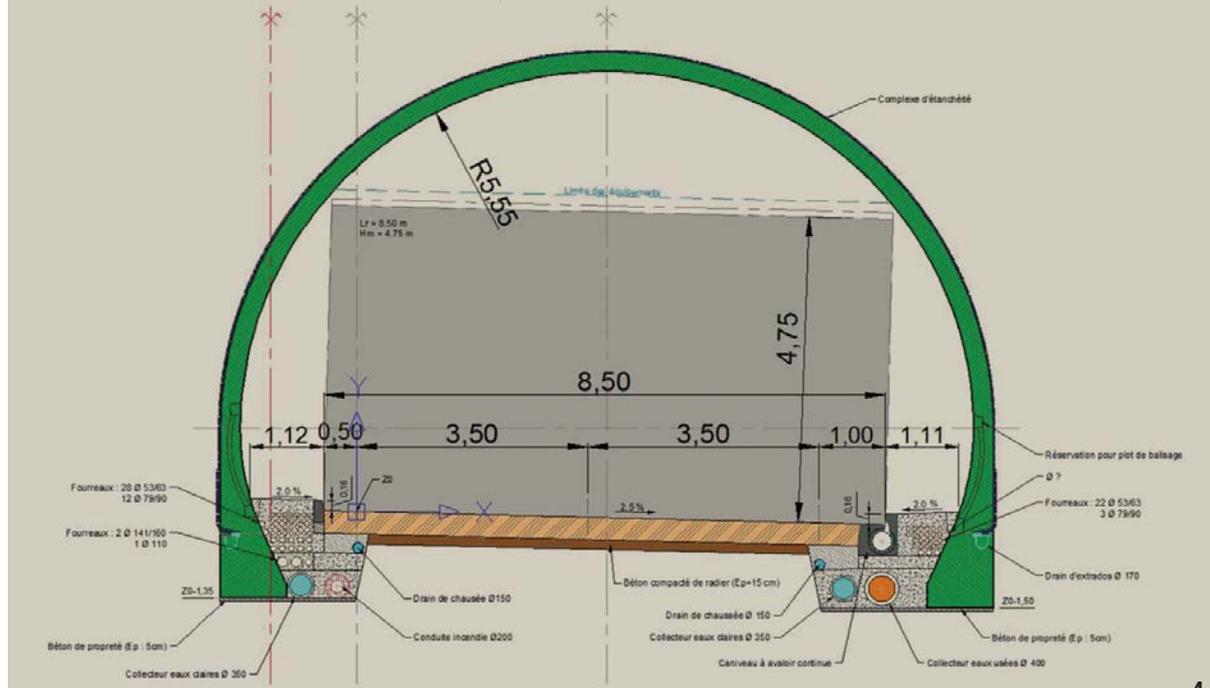
3- Vue en plan des tunnels.

4- Coupe transversale de chaque tube.

5 & 6- Illustrations de têtes de tunnel.

7- Coupe géologique du tunnel de Violay et exemples de carottes illustrant la géologie rencontrée.

COUPE TRANSVERSALE DE CHAQUE TUBE



4

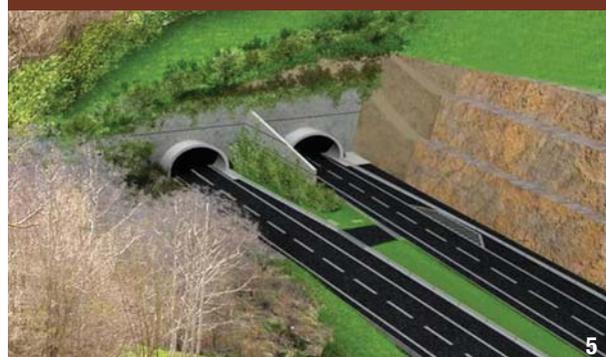
3- Plan view of the tunnels.

4- Cross section of each tube.

5 & 6- Illustrations of tunnel portals.

7- Geological cross section of Violay tunnel and examples of core samples illustrating the geology encountered.

TÊTE EST VIOLAY



5

TÊTE OUEST CHALOSSET



6

PHOTOS 5 & 6 © CABINET SOBERGO

grands types de roche du massif central rencontré le long des trois tunnels :

- Les roches magmatiques constituées du socle ancien ou d'intrusions granitiques (figure 7, **orange** ou **rouge**) ;
- Les roches métamorphiques formées par la recristallisation de roches sédimentaires ou magmatiques (figure 7, **vert**) ;

→ Les roches sédimentaires résultant de l'accumulation et du compactage de débris d'origine minérale et organique, parfois riches en charbon (figure 7, **gris**). Au final, ces reconnaissances ont conduit à choisir une méthode de creusement conventionnel (explosif ou mécanisé) et à définir des profils de soutènement susceptibles d'être mis en

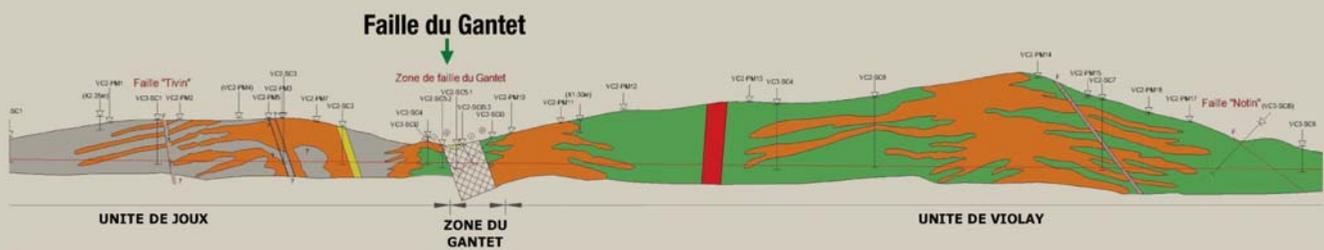
place en fonction des terrains rencontrés avec, selon les besoins, du béton projeté, des boulons d'ancrage, des cintres et, localement, du présoutènement (tubes pétroliers, boulons autoforeurs, boulons en fibre de verre).

#### PROTÉGER LE MILIEU NATUREL

L'ordonnancement des travaux, le tracé

et le profil en long de l'autoroute ont été optimisés afin que le mouvement des terres permette la réutilisation de l'ensemble des matériaux extraits des tunnels. Compte tenu de l'intérêt piscicole et écologique majeur du Boussivire (tête Est du tunnel de Violay), ASF a retenu un tracé préservant intégralement ce cours d'eau en phase chantier et en phase ▷

### COUPE GÉOLOGIQUE DU TUNNEL DE VIOLAY ET EXEMPLES DE CAROTTES ILLUSTRANT LA GÉOLOGIE RENCONTRÉE



**Unité de Joux :**

- Siltites
- Microgranites

**Unité de Violay :**

- Métavolcanites, métasiltites
- Microgranites



7

### ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ ET D'EXPLOITATION

Les trois tunnels de l'A89 posséderont les équipements de sécurité et d'exploitation suivants :

- Deux alimentations électriques distinctes, issues de deux départs différents du distributeur ;
- Un système de ventilation longitudinale avec 60 accélérateurs pour le tunnel de Violay, 32 pour le tunnel de La Bussière et 27 pour le tunnel de Chalosse. En cas d'incendie, ce système permet d'assurer un courant d'air longitudinal de 4 m/s nécessaire pour les TMD ;
- Un système d'éclairage comprenant : un éclairage de base constitué d'une file de luminaires située au-dessus de la voie rapide de chaque tube ; un éclairage de renfort aux têtes de tunnel ; une mise en valeur des issues de secours par des feux flash sur les piédroits en entrée des by-pass et un éclairage permanent dans chaque by-pass ; des plots de balisage sur les deux piédroits ;
- Un système de communication basé sur des postes d'appel d'urgence situés dans les niches de sécurité et un moyen de radiocommunication ;
- Une signalisation fixe et dynamique comprenant notamment des barrières de fermeture aux têtes ;

- Un réseau incendie avec une conduite dans chaque tube sous chaussée connectée aux poteaux incendie disposés dans les niches incendie et au réservoir situé en point haut avec des surpresseurs ;
- Des équipements de détection et mesures comprenant : une vidéosurveillance (caméra tous les 80 m) ; une détection automatique d'incidents (DAI) ; des contacts de décrochés extincteurs et signaux d'ouverture de porte ; des capteurs CO, NO et opacimètres ; des anémomètres ;
- Une gestion technique centralisée (GTC) facilitant le pilotage de l'exploitation des ouvrages.

Concernant le dimensionnement de la ventilation, qui dépend fortement de la différence de pression aux têtes de tunnel, notamment pour un long tunnel, on a effectué une campagne de mesures sur les trois tunnels pour valider les hypothèses prises en compte dans les études. Cette campagne a consisté à mettre en place un système de mesures relativement complexe à chacune des têtes (pression atmosphérique, direction du vent, intensité du vent, température, taux d'humidité) et un système de synchronisation des mesures entre les deux têtes permettant de mesurer en permanence, sur une durée représentative, les différences de pression entre les têtes des ouvrages.



**8- Tête Est du tunnel de Violay.**

**8- East portal of Violay tunnel.**

d'exploitation, sur toute sa longueur, entre le tunnel de Violay et l'échangeur de Tarare. Afin d'établir une barrière physique et écologique entre le projet et le ruisseau du Boussuivre, le tracé a été repoussé vers le massif, ce qui a entraîné des terrassements importants compte tenu de la topographie de la vallée (photo 8). Cette contrainte a également complexifié le tracé du tunnel et les conditions d'entrée du tunnel de Violay, avec un tympan biais. Mais ces difficultés ont été totalement assumées par ASF pour se donner toutes les chances de préserver le vallon du Boussuivre et ses espèces protégées.

Le chantier de l'A89 Est, et notamment le tunnel de Violay, se situent en effet dans un environnement naturel remarquable. Côté Rhône, le Boussuivre et sa vallée constituent un habitat pour de nombreuses espèces protégées, en particulier l'écrevisse à pieds blancs (photo 9). Côté Loire, le tunnel de Violay débouche dans la vallée du Gand qui abrite également cette espèce.

Pour préserver cet environnement, plusieurs dispositions ont été prises. Tout d'abord, tout le personnel travaillant sur les chantiers de l'A89 doit participer à une formation de sensibilisation à l'environnement animée par les associations de protection de la nature qu'ASF a voulu, dès le début de l'opération, associer à la conception du projet. Ensuite, compte tenu de la présence d'espèces protégées aux deux têtes du tunnel de Violay, les eaux d'exhaure sont traitées à chaque tête de tunnel dans une station spécifique avant d'être acheminées à 4 km en aval, pour être rejetées dans un milieu moins sensible. Enfin, dans le cadre des travaux de terrassement de part et d'autre du tunnel, et en cas de pollution accidentelle qui entraînerait une mortalité massive des écrevisses, ASF a demandé au Muséum d'histoire naturelle de Besançon de prélever dans le Boussuivre et dans le Gand un certain nombre de spécimens et d'assurer leur reproduction afin de pouvoir les réintroduire le cas échéant dans les deux ruisseaux (photo 10).

**LIMITER L'IMPACT SUR LES RIVERAINS**

La proximité de la ville de Tarare a conduit à imposer dans les marchés

© ASF/PASCAL LE DOARÉ



9



10

PHOTOS 9 & 10 © ASF/FRANCIS MAINARD

de travaux de génie civil des contraintes fortes pour limiter l'impact du chantier sur les riverains.

Ainsi, pour les tunnels de La Bussière et de Chalosset, seule une attaque principale bitube par tunnel a été autorisée. Les deux étaient situées à l'opposé de la ville de Tarare. Cette disposition a permis de limiter le bruit mais également d'éviter tout le transit du chantier à travers les quartiers résidentiels de Tarare (photo 1 et figure 11).

Par ailleurs, sur l'attaque Est du tunnel de Chalosset, l'activité se déroule exclusivement du lundi au vendredi, soit 14 postes avec interdiction de tris de nuit.

**9 & 10- Pêche de sauvegarde des écrevisses dans le Boussuivre.**

**11- Tunnels de La Bussière et de Chalosset, à proximité de la ville de Tarare.**

**9 & 10- Fishing to safeguard crayfish in the Boussuivre.**

**11- La Bussière and Chalosset tunnels, near the town of Tarare.**

### TROIS CHANTIERS SIMULTANÉS

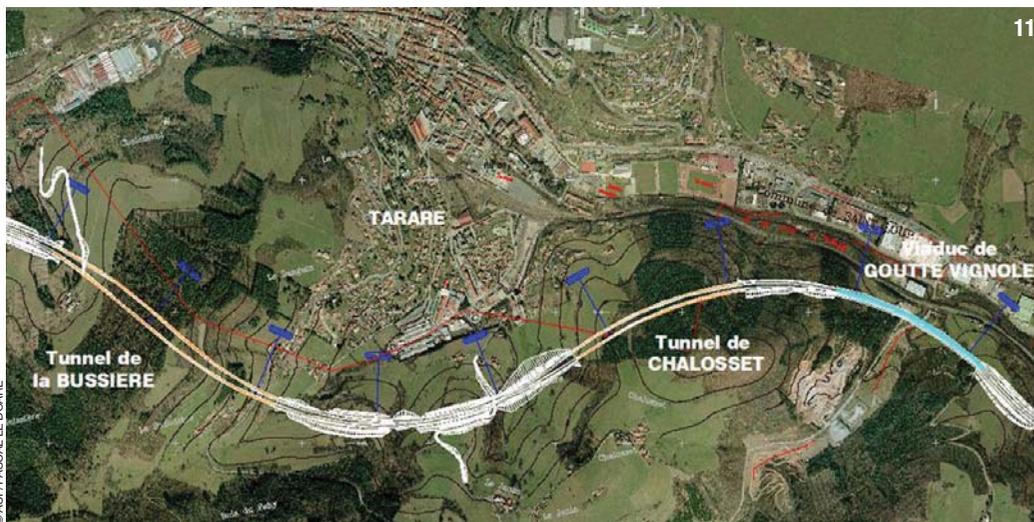
Compte tenu des objectifs de planification définis par ASF et fixant la mise en service à la fin de l'année 2012, les travaux de génie civil sont réalisés quasiment en parallèle sur les trois tunnels. En 2010, pour la phase de creusement à l'explosif, ils représentent quatre attaques bitubes ou huit fronts sur un linéaire de 15 km environ.

Ces travaux de creusement concernent actuellement 600 personnes, 1,1 million de m<sup>3</sup> de déblais à extraire, trois centrales à béton dédiées aux tunnels, quatre stations ou complexes de traitement des eaux de chantier, trois pelles Broyt et cinq chargeuses, dix pelles équipées de

BRH ou de fraise, cinq jumbos trois bras robotisés, six boulonneurs, huit robots à béton projeté et quatre érecteurs de cintres.

Les travaux de génie civil se poursuivront en 2011 avec une activité également très intense, comprenant notamment 11 coffrages-outils de revêtement de section courante, 11 portiques d'éanchéité, 260 000 m<sup>3</sup> de béton pour le revêtement et les trottoirs, et 600 km de fourreaux.

En 2012, un autre chantier exceptionnel débutera : il concernera tous les équipements à mettre en place dans les trois tunnels, soit 12 km de tubes à équiper au cours de l'année. □



11

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** ASF

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Egis tunnels

**ENTREPRISES CHARGÉES DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL :**

- Tunnel de Violay : groupement Eiffage TP-Dodin Campenon Bernard ;
- Tunnel de la Bussière : groupement Spie Batignolles TPCI-Razel ;
- Tunnel de Chalosset : groupement Razel-Spie Batignolles TPCI.

### ABSTRACT

#### THE A89 EAST MOTORWAY TUNNELS

JEAN-JACQUES LACAZE, ASF - XAVIER RICHER DE FORGES, ASF - HUBERT TOURNERY, EGIS - FRÉDÉRIC BULTEL, EGIS

**The A89 East motorway project, 50 km long, between Balbigny and La Tour de Salvagny, includes three tunnels over a length of 15 km: Violay tunnel (4 km), La Bussière tunnel (1 km), and Chalosset tunnel (0.7 km). Numerous constraints, especially environmental constraints, had to be taken into account in order to limit the impact on local residents and protect the natural environment. Furthermore, the scheduling targets result in exceptional underground works activity in a very limited sector, with eight simultaneous working faces in the tunnel driving phase in 2010 and 11 continuous sectional formworks in 2011 for execution of the concrete lining for the approximately 12 km of tube. □**

#### LOS TÚNELES DE LA AUTOPISTA A89 ESTE

JEAN-JACQUES LACAZE, ASF - XAVIER RICHER DE FORGES, ASF - HUBERT TOURNERY, EGIS - FRÉDÉRIC BULTEL, EGIS

**El proyecto de autopista A89 Este, de una longitud de 50 kilómetros entre Balbigny y La Tour de Salvagny, consta de tres túneles para una longitud total de 15 kilómetros: el túnel de Violay (4 kilómetros), el túnel de La Bussière (1 kilómetro), y el túnel de Chalosset (0,7 kilómetro). Se han tenido que integrar numerosos imperativos, fundamentalmente, medioambientales, con objetivo de reducir el impacto sobre el vecindario y preservar el entorno natural. Asimismo, los objetivos en términos de planificación conducen, para un sector sumamente limitado, a una actividad excepcional de trabajos subterráneos, con ocho frentes de ataque simultáneos en fase de excavación en 2010 y 11 encofrados-herramientas de tramo recto en 2011 para la realización del hormigón de revestimiento de los casi 12 kilómetros de tubo. □**

# ENTRE LOIRE ET RHÔNE : LE TUNNEL DE VIOLAY

AUTEURS : ALBAN MARTINOTTO, DIRECTEUR DE PROJET, DODIN CAMPENON BERNARD - JACQUES RENARD, CHEF DE SECTEUR TRAVAUX SOUTERRAINS, EIFFAGE TP - MICHEL GOUVERNEUR, DIRECTEUR ACTIVITÉ TRAVAUX SOUTERRAINS, DODIN CAMPENON BERNARD

L'AUTOROUTE A89 ENTRE BALBIGNY (LOIRE) ET LA TOUR DE SALVAGNY (RHÔNE) TRAVERSE LES MONTS DU LYONNAIS ET DU BEAUJOLAIS. CE TRACÉ A CONDUIT ASF (MAÎTRE D'OUVRAGE) À RÉALISER DES OUVRAGES D'ART COMPLEXES, DONT LE TUNNEL DE VIOLAY. CELUI-CI EST UN OUVRAGE MAJEUR QUI PERMET DE FRANCHIR DES CRÊTES ÉTAGÉES DE 800 À 900 M D'ALTITUDE CONSTITUANT LA LIGNE DE PARTAGE DES EAUX ENTRE LES BASSINS VERSANTS DE LA LOIRE ET DU RHÔNE.



1 - Vue d'ensemble  
des installations  
sur l'attaque Ouest.

1 - General view  
of the facilities  
on the western  
working face.

### UN OUVRAGE DE 3 900 M

Le tunnel de Violay (figure 2) est constitué de deux tubes unidirectionnels présentant une distance entre piedroits de 27 m en section courante. Les deux tubes ont une pente unique de 0,72 % descendante vers l'Est sur toute leur longueur. La longueur totale du tunnel est de 3 900 m environ. Le profil en travers de l'ouvrage terminé est composé de deux trottoirs, de deux bandes dérasées de 1 m, et de deux voies de circulation de 3,50 m. Le devers est de 2,5 % constant vers la droite en regardant le sens de circulation. Les deux tubes constituant le tunnel sont reliés par 13 by-pass (six by-pass véhicules de secours et sept by-pass piétons).

Les travaux souterrains comprennent également la réalisation d'un parking, de deux garages, 52 niches de sécurité, 24 niches d'incendie, une sous-station électrique, les blocs techniques en trottoir accueillant les fourreaux et les conduites des réseaux secs et humides, et les chambres de tirage de ces réseaux (figure 4).

### DEUX GRANDES UNITÉS GÉOLOGIQUES

Le tunnel traverse deux grandes unités géologiques séparées par la faille du Gantet. À l'Ouest, l'unité de Joux s'étend sur environ 1 300 m. Celle-ci est composée de roches sédimentaires (h1-2), siltites, grès, pélites et de conglomérats

« LES DEUX TUBES CONSTITUANT LE TUNNEL SONT RELIÉS PAR 13 BY-PASS »

de galets calcaires injectés de microgranites majoritairement granophyres (h2μγ). Au niveau de la fracturation, la stratification du massif est subhorizontale et le pendage reste compris entre 13° et 25°, avec un réseau de diaclases secondaires plutôt subvertical (pendage de 65° et 75°). La faille du Gantet est une zone classée mylonitisée constituée de blocs de toutes tailles noyés dans de la roche broyée plus ou moins argilisée, dont la largeur serait de 100 m environ. À l'Est, l'unité de Violay s'étend sur environ 2 400 m. Elle est composée de roches volcanosédimentaires (tV-2) métasiltites et métapélites injectées de microgranite majoritairement granophyres (h2μγ). ▷

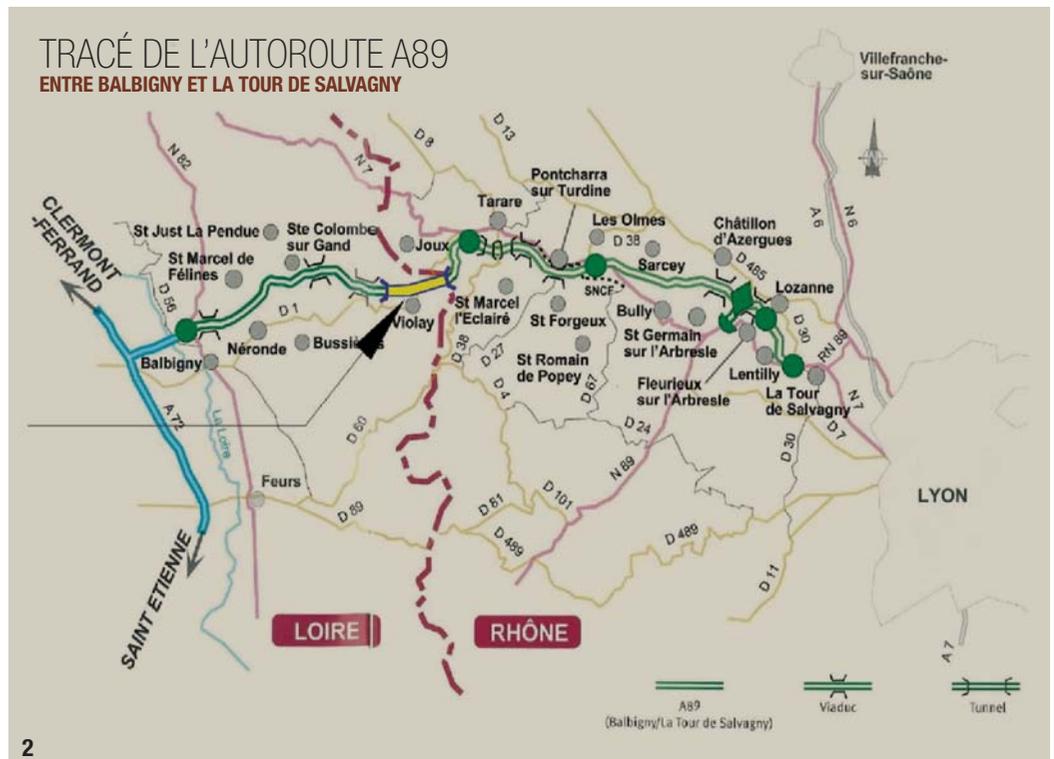


Au niveau de la fracturation, les discontinuités principales du massif ont un plus fort pendage que dans l'unité de Joux : de 15° à 45° avec un réseau de diaclases secondaires de pendage variant entre 45° et 70° (figure 6).

Les caractéristiques géotechniques des diverses zones du massif traversées par le tunnel ont conduit à retenir trois familles de soutènements (voir encadré : Trois familles de soutènements).

### ORGANISATION DES TRAVAUX

L'ordre de service notifié par ASF le 28 janvier 2009 au groupement d'entreprises Eiffage TP (mandataire)-Dodin Campenon Bernard (gérant) a lancé la phase préparation et installation de chantier. Cette étape a duré six mois et a permis de réaliser les entrées en terre sous voûtes parapluies sur les deux têtes et de mener à bien les installations de chantier (de 15 300 m<sup>2</sup> chacune) comprenant notamment, pour chaque tête, une centrale à béton, les bureaux, les cantonnements, les ateliers-magasins, le stockage de l'émulsion Morse et la station de traitement des eaux d'exhaure du tunnel, d'une capacité de 100 m<sup>3</sup>/h. Le premier tir de mine a eu lieu le 26 août 2009 dans le tube nord de l'attaque Ouest. Au 1<sup>er</sup> septembre 2010, l'effectif total du personnel travaillant sur le chantier du tunnel de Violay était de 370 personnes environ, y compris les sous-traitants, prestataires et personnels en intérim. Les quatre équipes de production du tunnel travaillent en 3 x 8 h, six jours sur sept, du lundi 6 h au samedi 22 h.



### MODES OPÉRATOIRES ET MATÉRIELS

Le tunnel de Violay étant réalisé par abattage à l'explosif, la présence d'habitations à proximité des têtes a contraint le chantier à ne pas utiliser ce procédé la nuit, entre 21 h et 7 h, sur les 450 premiers mètres à la tête Ouest et les 250 premiers mètres à la tête Est. La foration des trous de mine est réalisée à l'aide d'un robofore à trois bras automatisés.

2- Tracé de l'auto-  
route A89 entre  
Balbigny et La Tour  
de Salvagny.

3- Boulonnage  
des parements.

2- Alignment of  
the A89 motorway  
between Balbigny and  
La Tour de Salvagny.

3- Rockbolting  
of the facings.

Cette prestation est sous-traitée à l'entreprise Robodrill.

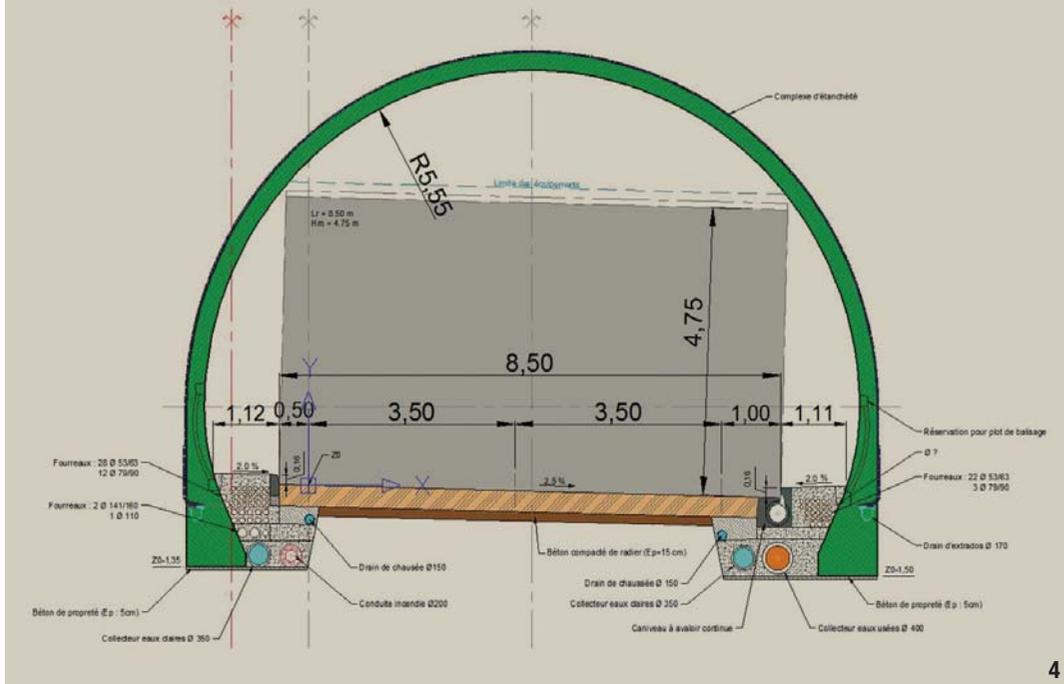
Les plans de tir sont établis sur le chantier. Chaque volée comporte actuellement 135 mines qui sont séquencées grâce aux détonateurs Nonel. La charge totale pour une volée de 5,80 m est d'une tonne d'émulsion pompable (système Morse).

Le séquençage permet de fractionner le tir en charge instantanée apte à respecter les contraintes de vibration.

3



## COUPE TYPE SECTION COURANTE



4

## PRINCIPALES QUANTITES

<b>DÉBLAIS :</b>	<b>780 000 m<sup>3</sup></b>
<b>BÉTON PROJETÉ :</b>	<b>65 000 m<sup>3</sup></b>
<b>REVÊTEMENT :</b>	<b>200 000 m<sup>3</sup></b>
<b>ANCRAGES ET ARMATURES :</b>	<b>700 tonnes</b>
<b>COFFRAGES :</b>	<b>195 000 m<sup>2</sup></b>
<b>BOULONS SWELLEX :</b>	<b>110 000 ml</b>
<b>BOULONS HA :</b>	<b>400 tonnes</b>
<b>CINTRES :</b>	<b>2 485 tonnes</b>
<b>ÉTANCHÉITÉ :</b>	<b>190 000 m<sup>2</sup></b>
<b>CHAUSSÉES :</b>	<b>72 400 m<sup>2</sup></b>

Actuellement, les vibrations enregistrées sont inférieures aux seuils de la réglementation et aux seuils plus contraignants imposés par le marché. Les vibrations des tirs de mines sont contrôlées à l'aide de sismographes installés sur les habitations situées sur le tracé du tunnel. Un bureau d'études spécialisé dans les contrôles sismiques analyse les enregistrements des vibrations au titre du contrôle externe du groupement. Le tir produit environ

### 4- Coupe type section courante.

### 5- Station de traitement.

### 4- Cross section on continuous section.

### 5- Treatment plant.

500 m<sup>3</sup> de marin. Le marinage est conduit à l'aide de trois pelles Brøyt (deux sur la tête Est).

Ces pelles sont assistées par un chargeur Caterpillar 966 sur chaque tête. Le transport du marin vers les zones de dépôt est sous-traité à l'entreprise La Pyrénéenne, qui gère la flotte de tombereaux Caterpillar A 730. Le marin mis en dépôt est utilisé par les entreprises de terrassement pour la confection des remblais de l'autoroute A89.

Des pelles Liebherr équipées de fraises assurent la purge du front, de la voûte et des piedroits. L'avancement est sécurisé par des boulons, du béton projeté ou des cintres suivant les profils décrits dans l'encadré : Trois familles de soutènements. Le béton projeté fourni par la SEP ATM-Lafarge est fabriqué sur les centrales à béton de chaque tête. La mise en œuvre du béton projeté se fait à l'aide de robots béton de marque Normet Spymec 9150 WP.

5



## TROIS FAMILLES DE SOUTÈNEMENTS

### SOUTÈNEMENT TYPE 1 ET 2 BOULONS ET DE BÉTON PROJETÉ

- **Profil type 2.1** : boulonnage systématique à raison de 1 boulon/4 m<sup>2</sup>, couche de béton projeté de 8 cm d'épaisseur (5 cm de béton projeté fibré + 3 cm de béton projeté) ;
- **Profil type 2.2** : boulonnage systématique à raison de 1 boulon/2 m<sup>2</sup>, couche de béton projeté de 13 cm d'épaisseur (10 cm de béton projeté fibré + 3 cm de béton projeté) ;
- **Profil type 2.3** : boulonnage systématique à raison de 1 boulon/2 m<sup>2</sup>, couche de béton projeté de 13 cm d'épaisseur (8 cm de béton projeté fibré + 5 cm de béton projeté).

### SOUTÈNEMENT TYPE 5 PROFIL CINTRÉ LOURD

- **Profil type 5.0** : boulonnage en fibre de verre du front (ancrages de 8 m de long avec un recouvrement de 4 m), béton projeté de confinement de 5 cm latéralement et au front, cintres HEB 180 espacés de 0,80 à 1,50 m, béton projeté en voûtelettes ou béton de blocage derrière blindage, ancrage en pied droit avec deux boulons  $\Phi$  25 de chaque côté ;
- **Profil type 5.1** : boulonnage en fibre de verre dans le front de la demi-section supérieure (ancrage de 8 m de long avec un recouvrement de 4 m), béton projeté de confinement de 5 cm latéralement et au front de la demi-section supérieure, cintres HEB 180 à oreille espacés de 0,80 à 1,50 m, béton projeté en voûtelettes ou béton de blocage derrière blindage, excavation par demi-section.

### SOUTÈNEMENT TYPE 8 PROFIL CINTRÉ LOURD AVEC PRÉ-SOUTÈNEMENT PAR VOÛTE-PARAPLUIE ET ÉVENTUELLEMENT CONTRE-VOÛTE

- **Profil type 8.1 avec voûte parapluie divergente** : voûte parapluie, béton projeté de confinement, cintres HEB 180 à oreille espacés de 1 à 1,20 m, micropieux éventuels sous longrines de demi-section supérieure, béton projeté fibré, stabilisation du front par boulons en fibre de verre de 15 m de long, excavation du front par demi-section ;
- **Profil 8.2 avec voûte parapluie divergente** : idem profil type 8.1 avec, en plus, un radier contre-voûté de 15 cm sur la demi-section supérieure, des drains en demi-section supérieure, une contre-voûte cintrée (HEB 180) et bétonnée. La mise en œuvre de ce profil est envisagée pour les zones de mylonite et les zones aquifères à fortes venues d'eau de la faille du Gantet.

Le groupement Eiffage TP-Dodin Campenon Bernard possède, sur chaque tête, deux boulonneurs mécanisés Sandvik DS510-C permettant de mettre en œuvre soit des boulons Swellex, soit des boulons en HA25 scellés à la résine (photo 3).

### PLAN DE RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT

Le tunnel de Violay est implanté dans une zone vallonnée.

Les cours d'eau sensibles à proximité (présence d'écrevisses à pattes blanches dans le Gand et le Bousuivre notamment), une faune et une flore précieuses imposent une synergie entre la construction et la nature. ASF (maître d'ouvrage), Egis tunnel (maître d'œuvre) et le groupement Eiffage TP-Dodin Campenon Bernard se sont engagés, à travers un Plan de respect de l'environnement, à respecter les contraintes environnementales du site en matière de qualité de l'eau rejetée dans le milieu naturel, de pollution des sols et de l'air, de traitement des déchets et

de limitation des nuisances pour les riverains.

Ainsi, deux stations de traitement des eaux (une sur chaque tête) épurent l'eau d'exhaure du tunnel et la recyclent, le surplus d'eau traitée étant rejeté dans le milieu naturel.

Un suivi continu des paramètres de contrôle (matières en suspension, hydrocarbures et pH) permet un rejet sans impact pour le milieu naturel (photo 5).

### DÉFIS À VENIR

À cette date, le tunnel de Violay est loin d'être terminé.

Il reste environ 1 700 m d'excavation à réaliser sur chaque tube, et à négocier le passage délicat de la faille du Gantet. Le revêtement intérieur du tunnel débutera en octobre 2010 pour les by-pass et en mars 2011 pour la section courante du tunnel. Les équipes motivées du groupement Eiffage TP-Dodin Campenon Bernard sont prêtes à relever ce défi pour livrer dans le délai imparti un ouvrage de qualité. □

## AVANCEMENT DU CHANTIER AU 1<sup>ER</sup> SEPTEMBRE 2010

### TÊTE OUEST TUBE SUD :

Excavation, 940 ml ; radier béton sous chaussée, 540 ml ;

### TÊTE OUEST TUBE NORD :

Excavation, 920 ml ; radier béton sous chaussée, 80 ml ;

### TÊTE EST TUBE SUD :

Excavation, 1 300 ml ; radier béton sous chaussée, 640 ml ;

### TÊTE EST TUBE NORD :

Excavation, 1 310 ml ; radier béton sous chaussée, 200 ml.

## ABSTRACT

### BETWEEN LOIRE AND RHONE: VIOLAY TUNNEL

ALBAN MARTINOTTO, DODIN CAMPENON BERNARD - JACQUES RENARD, EIFFAGE TP - MICHEL GOUVERNEUR, DODIN CAMPENON BERNARD

The A89 motorway between Balbigny (Loire) and La Tour de Salvagny (Rhône) passes through the mountains of the Lyonnais and Beaujolais regions. Given this route, the contracting authority, ASF, had to execute complex engineering structures, including Violay tunnel. This major structure provides a crossing through the peaks, ranging from 800 to 900 metres in altitude, which form the watershed between the Loire and Rhône catchment areas. □

### ENTRE LOIRA Y RÓDANO: EL TUNEL DE VIOLAY

ALBAN MARTINOTTO, DODIN CAMPENON BERNARD - JACQUES RENARD, EIFFAGE TP - MICHEL GOUVERNEUR, DODIN CAMPENON BERNARD

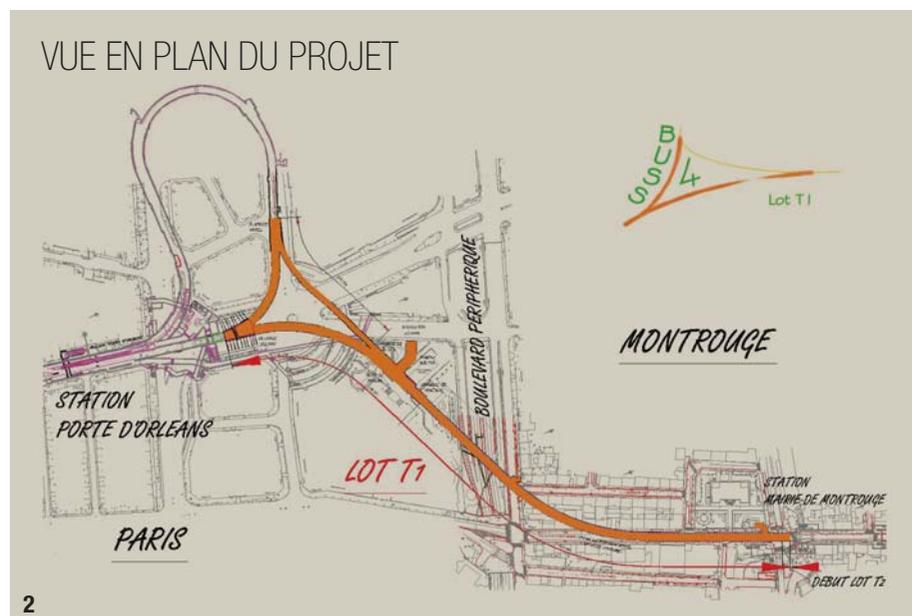
La autopista A89 entre Balbigny (Loira) y La Tour de Salvagny (Ródano) atraviesa los montes de las comarcas de Lyonnais y Beaujolais. Este trazado ha conducido ASF (empresa contratante) a ejecutar unas obras de fábricas complejas, entre las cuales el túnel de Violay. Este último corresponde a una importante estructura que permite el franqueo de cumbres escalonadas entre 800 y 900 metros de altitud que constituyen la línea divisoria de aguas entre las cuencas hidrográficas del río Loira y del Ródano. □

# RATP LIGNE 4, LOT T1 : UN CONCENTRÉ DE MÉTHODES POUR LA RÉALISATION D'OUVRAGES SOUTERRAINS

AUTEURS : VALÉRIE DORE ROQUETA, DIRECTEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY - BERNARD BIZON, DIRECTEUR PROJET, BEC FRÈRES

LE LOT T1 DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 4 DU MÉTRO, À PARIS, COMPREND 940 M D'OUVRAGES SOUTERRAINS ENTRE LA STATION PORTE D'ORLÉANS (TERMINUS ACTUEL) ET LA FUTURE STATION MAIRIE DE MONTROUGE.

LA PRÉSENCE D'ANCIENNES CARRIÈRES SOUTERRAINES, LES SUJÉTIONS LIÉES AUX TRAVAUX DE RACCORDEMENT À DES VOIES RATP EN EXPLOITATION, LE CONTEXTE DE CIRCULATION À L'UNE DES PORTES D'ACCÈS À PARIS LES PLUS CHARGÉES, LE PASSAGE SOUS LE BOULEVARD PÉRIPHÉRIQUE PUIS SOUS DES BÂTIMENTS ANCIENS À MONTROUGE ONT NÉCESSITÉ LA MISE EN ŒUVRE SIMULTANÉE DE NOMBREUSES MÉTHODES DE TRAVAUX SOUTERRAINS.



2- Vue en plan du projet.

2- Plan view of the project.

son tracé a été réalisée en travaux à ciel ouvert. Les ouvrages existants sont ainsi faiblement enterrés, et le terminus Porte d'Orléans ne déroge pas à la règle avec une couverture de l'ordre de 2 m. Le tracé du prolongement prévoit cependant un passage de la ligne sous le boulevard périphérique, qui est en trémie relativement profonde dans cette zone. La voie doit donc plonger avec une pente jusqu'à 5 % pour passer sous les ouvrages du périphérique (chaussée et ouvrages d'assainissement).

Les ouvrages du lot T1 ont donc une couverture comprise entre 2 et 12 m. Par ailleurs, les ouvrages souterrains à construire ont des géométries variables : ouvrage cadre ou tunnel voûté avec des ouvertures allant de 3 à 14 m, en passant par 5 m pour les tunnels avec une voie de circulation et 7,40/7,80 m pour les tunnels avec deux voies de circulation.

## 1 800 M D'OUVRAGES SOUTERRAINS

Au Sud de Paris, au départ de la station Porte d'Orléans, la RATP prolonge la ligne de métro n° 4 vers la ville de Montrouge (phase 1), puis vers Bagneux (phase 2). La phase 1 représente environ 1 800 m d'ouvrages souterrains comprenant les ouvrages de raccordement au réseau existant, les tunnels à la porte d'Orléans, l'entonnement Koufra, le tunnel interstation, la station souter-

raine Mairie de Montrouge, le tunnel d'arrière-station, et des ouvrages annexes (ventilation, épuisement, zones techniques). La phase 1 est décomposée en deux lots : lot T1, Porte d'Orléans-Mairie de Montrouge ; lot T2, Mairie de Montrouge-tunnel cul-de-sac et site de maintenance (figure 2).

Le projet se raccorde ainsi sur une boucle existante au Sud de la station Porte d'Orléans, qui restera parcourue pendant toute la durée des travaux par

les rames de métro (un train toutes les deux minutes). Le projet impose donc de démolir le tunnel existant et de construire les deux ouvrages de raccordement prévus en conservant cette circulation.

## COUVERTURE VARIABLE

Les travaux de la ligne 4 « historique » ont démarré en 1905. Bien qu'il s'agisse de la première ligne parisienne à passer sous la Seine, la majorité de

## SOUS-SOL CHANGEANT

Du fait de la variation de couverture, le projet se situe dans différentes couches du sol parisien, mais deux formations sont principalement concernées : les marnes et caillasses et le calcaire grossier. Il faut noter que l'ensemble du projet est hors nappe.

Dans la zone comprise entre la porte d'Orléans et le mur de soutènement du boulevard périphérique intérieur, ▷



PHOTOS © FRANCK BILLON, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY

3

**3- Confortement direct.**

**4- Tunnel métallique dans la boucle en exploitation.**

**3- Direct consolidation.**

**4- Steel tunnel in the loop in service.**



4

le calcaire grossier a été autrefois exploité en carrières. Le lot T1 a donc rencontré des zones de calcaire grossier exploité et remblayé (avec un clavage partiel en ciel de carrières), de calcaire grossier intact, de marnes et caillasses affectées par les carrières et de marnes et caillasses intactes.

La couverture variable, les nombreuses géométries d'ouvrages, la nature du

sous-sol mais aussi les contraintes inhérentes à l'environnement urbain dense et sensible et à la ligne en exploitation ont conduit le maître d'œuvre Xelis, en phase conception, puis le groupement Buss, en phase exécution, à recourir à de nombreuses méthodes de réalisation des ouvrages, chaque méthode répondant à une contrainte différente.

### CONFORTEMENT DES CARRIÈRES

Avant le démarrage des travaux d'excavation, les anciennes carrières situées au droit du tracé ont été confortées. Trois méthodes ont été utilisées : les injections liquides, les confortements par piliers maçonnés et les injections solides.

Dans les zones où le radier de l'ouvrage se situe à plus de 3 m au-dessus des

carrières, les confortements ont été réalisés par injections de coulis bentonite-ciment après forage depuis le terrain naturel ou depuis le radier des ouvrages en construction et mise en place de tubes à manchettes.

Dans les zones où le radier de l'ouvrage se situe à moins de 3 m des carrières, voire dans les carrières, la méthode par confortement direct a été mise en

œuvre, en respectant les recommandations de l'Inspection générale des carrières, c'est-à-dire :

→ Réalisation de puits d'accès à la veine de calcaire grossier (soit en terrassement traditionnel, soit par forage 1400 avec une virole métallique quand la foreuse avait la place de s'installer en surface) ;

→ Terrassement et évacuation du remblai de carrières par ces puits ;

→ Création de plots de confortement avec du mortier mis en œuvre par pompage, puis projection pour le clavage final ; les piliers « maçonnés » ont en fait été des piliers bétonnés (photo 3). Le confortement direct nécessite une

intervention humaine dans des condi-

tions délicates (carrière existante entre 1,20 et 2,10 m de haut). Au Nord du boulevard périphérique, dans la zone confortée en bordure de la masse non exploitée qui, de ce fait, était une zone de cisaillement de la dalle calcaire et qui contenait une zone reconnue de fontis, le ciel de carrières s'est progressivement dégradé, de

sorte que le confortement direct n'était plus possible dans des conditions satisfaisantes de sécurité. Le groupement a donc proposé et mis en œuvre des injections solides. Une foreuse installée en haut puis en bas du mur de soutènement de la bretelle d'accès au boulevard périphérique intérieur a ainsi foré en tiges tubes puis injecté en remontant un mortier. Les injections comportaient une première phase de ceinturage, puis un quadrillage (primaire-secondaire). Elles se sont achevées par une phase de serrage avec des injections liquides depuis des tubes à manchettes.

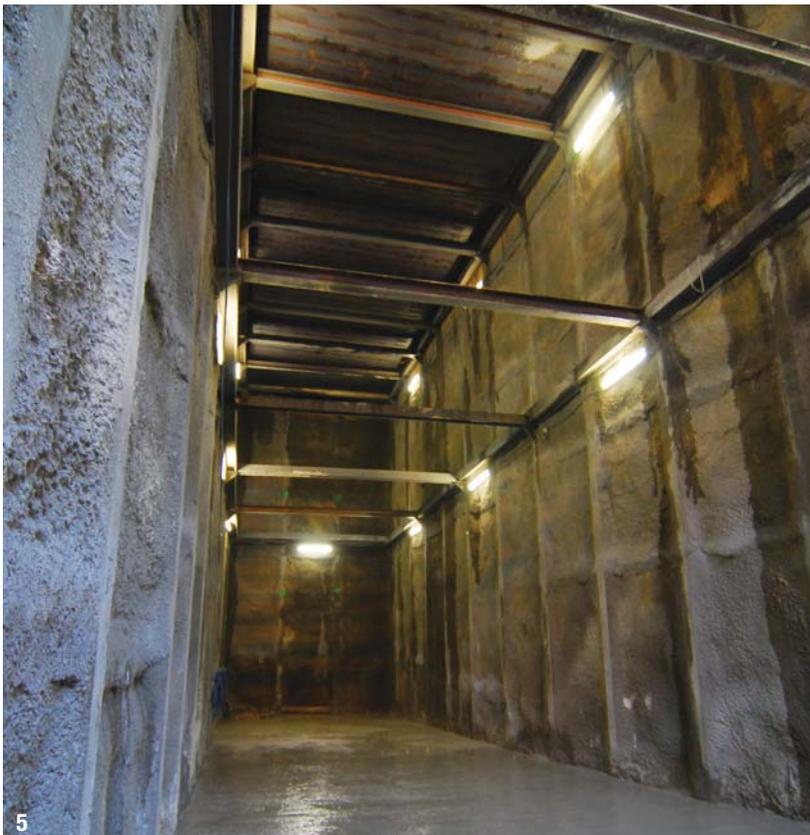
### TRAVAUX DANS LA BOUCLE D'EXPLOITATION

Pour maintenir la circulation dans la boucle, le groupement a construit, au droit de chacun des ouvrages de raccordement, un tunnel métallique reposant sur des longrines en béton. Ces longrines et ce tunnel métallique, véritable mecano de pièces (cintres et tôles), ont dû être construits puis démolis, après construction des ouvrages, pendant des périodes réduites (de nuit entre 2 h et 4 h 30 du matin, pendant l'arrêt de l'exploitation du métro) (photo 4).

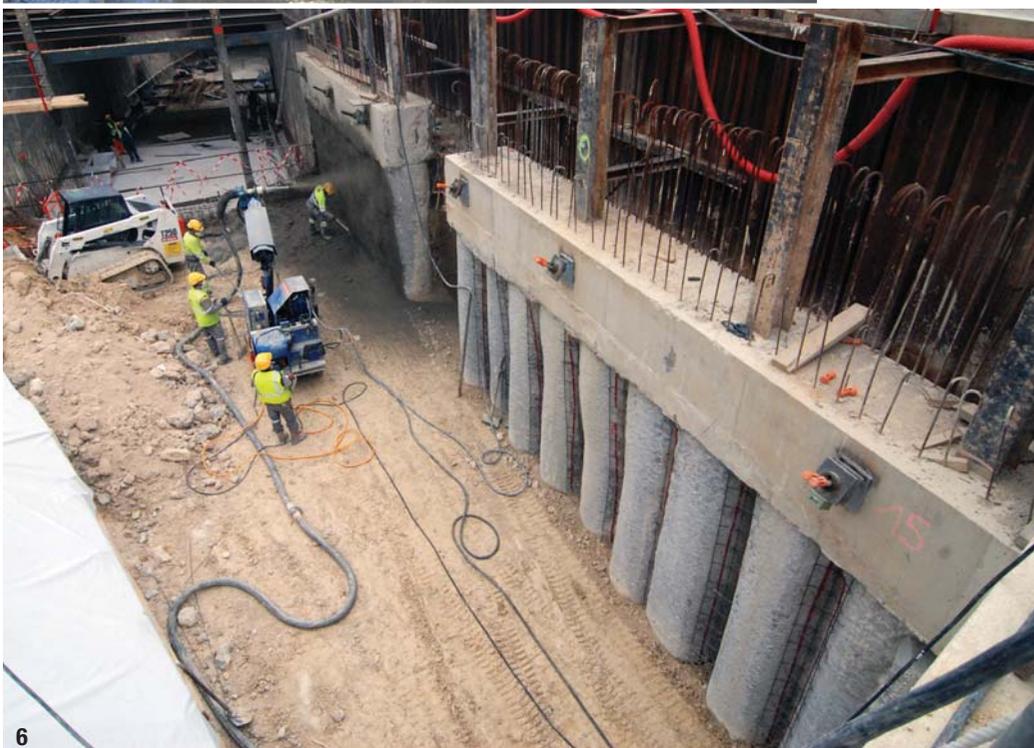
Le chantier a été divisé en deux zones en fonction de la hauteur de couverture et de l'environnement en surface : entre 1,80 et 6 m de couverture environ, les ouvrages sont réalisés à ciel ouvert ; au-delà, ils sont réalisés en souterrain. Pour le ciel ouvert, les ouvrages de génie civil de type cadre rectangulaire ont été réalisés à l'abri de soutènements provisoires :

→ Paroi berlinoise soutenue par des tirants longue durée ou des butons (profilés ou tubes ronds) : ce soutènement classique a été réalisé par forage à sec de pieux à la tarière et scellement des poteaux HEB au béton dans la plupart des cas. Partout où cela s'est avéré nécessaire du fait des méthodes, des tirants précontraints ou non ont été préférés aux butons pour soutenir les voiles provisoires. Les emprises à ciel ouvert étant en zone de très forte circulation, de nombreuses zones de soutènement ont été couvertes par des ponts provisoires métalliques posés immédiatement après forage et mise en place des profilés berlinois. Dans ce cas, le terrassement s'est effectué sous ces ponts provisoires (photo 5) ;

→ Pieux jointifs : pour l'ouvrage de raccordement Leclerc, dont l'impact en surface est situé en plein milieu de la place du 25-août-1944, l'une des artères principales d'accès à Paris, ▷



5



6

**5- Ciel ouvert sous pont provisoire.**

**6- Ouvrage Leclerc en pieux jointifs et tirants.**

**5- Open-air site under temporary bridge.**

**6- «Leclerc» structure of close-jointed piles and tie anchors.**

dans le prolongement de l'avenue de la porte d'Orléans, la difficulté consiste à limiter la dimension de l'emprise en surface pour maintenir en permanence au moins deux voies dans chaque sens de circulation.

Dans ces conditions, il n'y avait plus assez d'espace pour permettre le coffrage des voiles définitifs contre le soutènement. C'est ainsi que le projet de Xélias a prévu un soutènement par pieux jointifs, qui ont constitué le revêtement définitif après rabotage et enduit (photo 6).

**NOMBREUSES MÉTHODES DE GÉNIE CIVIL**

Les ouvrages cadres et de raccordement ont donc été réalisés, après terrassement, à l'abri de soutènements provisoires de différents types.

Le génie civil n'est pas en reste quant à la variabilité des méthodes :

→ Génie civil coulé en place : les ouvrages de tunnel à ciel ouvert ont été classiquement ferrailés, coffrés après éventuel étaielement et coulés en place avec le phasage radier, voiles puis dalle de couverture. Il en fut de même pour le radier des ouvrages de raccordement (à noter, le scellement du ferrailage dans le radier conservé du métro en exploitation) et les voiles du raccordement Appell ;

→ Génie civil préfabriqué sur site : un égout traversant l'ouvrage de raccordement Leclerc a dû être dévié et reconstruit ; l'égout neuf a été préfabriqué en surface et mis en place en une seule opération de levage nocturne ;

→ Génie civil préfabriqué en usine : pour les dalles de couverture des ouvrages de raccordement réalisées au-dessus des voies RATP en exploitation, le groupement a proposé et mis en place un système de poutres préfabriquées en T inversé, posées côte à côte et dont les nervures ont été remplies de béton allégé (500 kg/m<sup>3</sup>) avant bétonnage de la dalle de compression supérieure, cela afin de constituer un ensemble sans vide et sans étaielement préalable (photo 1 et figure 7).

**TRAVAUX EN SOUTERRAIN**

Les méthodes de terrassement en souterrain ont dû répondre à la fois à la grande variété de type d'ouvrages, avec des ouvertures de 3 à 14 m, à des horizons variables dépendant des variations géologiques, de la présence d'anciennes carrières sous-jacentes, mais surtout de la hauteur de couverture, et à des contraintes de tasse-

ments de surface différentes en fonction de l'environnement de surface. À cet égard, le tunnel interstation, comprenant le passage sous le boulevard périphérique puis sous les bâtiments à Montrouge, était le plus sensible.

Nous présenterons maintenant les principes généraux qui ont été suivis pour les travaux souterrains.

Les caractéristiques ont été ponctuellement adaptées sur consigne du chargé des ouvrages provisoires suite à l'analyse géologique des fronts ou aux résultats des auscultations.

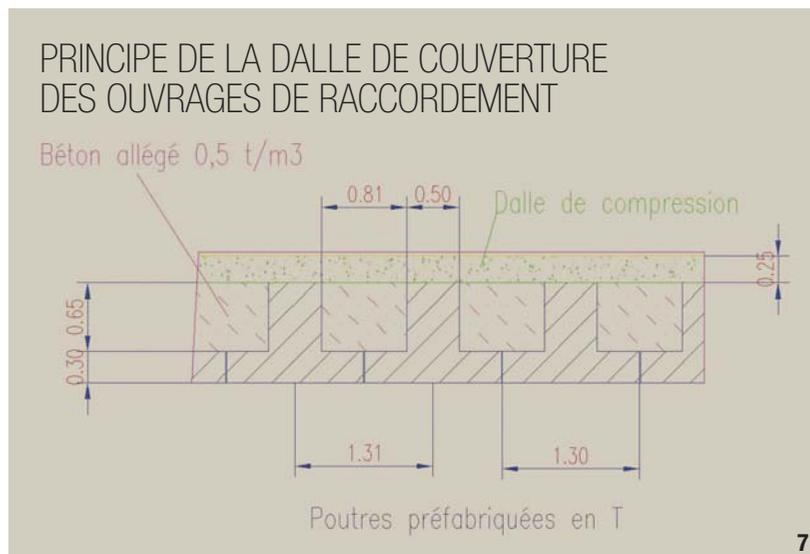
**HORS TUNNEL INTERSTATION**

Concernant le soutènement provisoire, dit traditionnel, le terrassement est réalisé par phases de longueur réduite (typiquement 1 m), avec confinement immédiat en béton projeté, pose de cintres lourds, complément de béton projeté. Les zones du front situées dans les marnes et caillasses sont systématiquement stabilisées au préalable avec des boulons de fibre de verre. Le terrassement du front est réalisé en section pleine (totalité de la surface) ou section divisée : demi-section supérieure (elle-

même éventuellement décomposée en four et galerie latérale de chaque côté), stross et enfin piedroits. Ainsi, le chantier du lot T1 a vu les configurations suivantes :

→ Pour les ouvrages de 3 à 5 m inclus sous couverture maximale, section pleine, et, sous couverture plus faible, section divisée ;

→ Pour les ouvrages de 7,40 à 12 m, section divisée avec, pour les chambres 10 et 12 m, demi-section supérieure divisée en four et galeries latérales (figure 8 et photo 9).

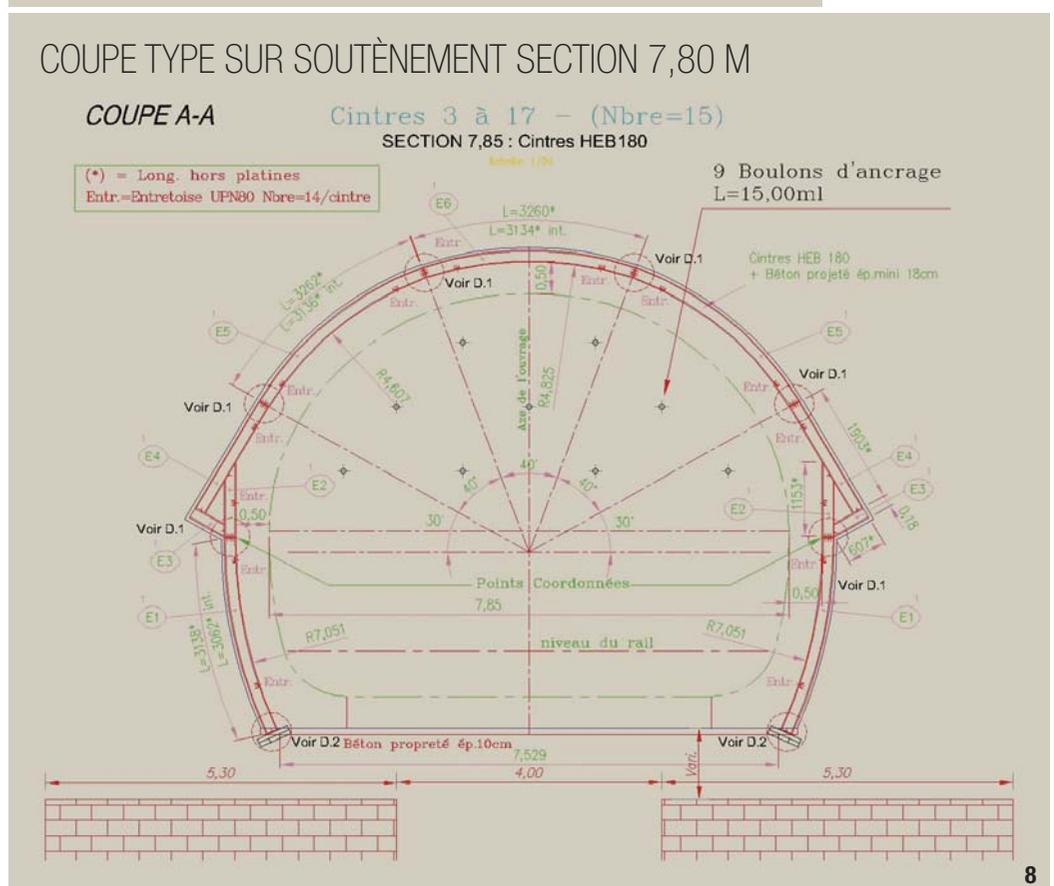


7- Principe de la dalle de couverture des ouvrages de raccordement.

8- Coupe type sur soutènement section 7,80 m.

7- Schematic of the cover slab for the connecting structures.

8- Typical cross section on 7.80 m section retaining structure.



8



**9- Terrassement piedroits chambre 12 m.**

**10- Schéma de principe de la seconde volée de voûte parapluie.**

**11- Forage de voûte parapluie.**

**9- Earthworks for 12 m chamber columns.**

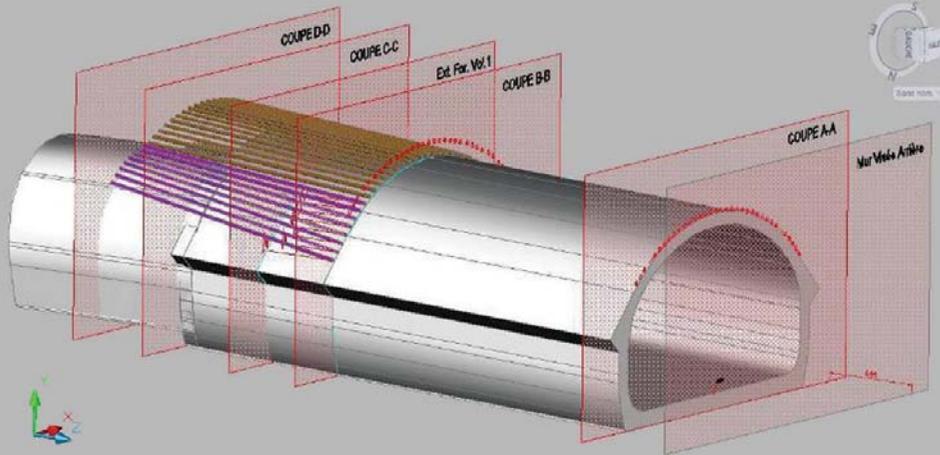
**10- Block diagram of the second umbrella arch round.**

**11- Umbrella arch boring.**

Pour l'ouvrage d'épuisement situé au point bas du tracé de l'ouvrage interstation, le terrassement a été effectué avec pose de cadres et blindage en palfeuilles métalliques.

Compte tenu de l'ouverture importante de la chambre de 14 m, un présoutènement a été réalisé en voûte parapluie. De longueur totale 31 m, le terrassement de cette chambre a nécessité deux volées de tir. Les tubes pétroliers de dimension 178, épaisseur 10 mm, sont mis en place par forage avec outil perdu en diamètre 210 puis scellés. Ils sont disposés au-dessus de la voûte avec un entraxe de 50 cm (figure 10 et photo 11). Dans tous les cas, le coulage des revêtements définitifs suit de près le soutènement avec autant de coffrages que de sections, et un découps variable entre 2 et 25 m (photo 12).

## SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA SECONDE VOLÉE DE VOÛTE PARAPLUIE



10



PHOTOS © FRANCK BILLON, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY

11

## TUNNEL INTERSTATION

Le tracé du tunnel interstation, d'une longueur de 433 m avec une ouverture de 7,40/7,80 m, passe sous le boulevard périphérique avec une faible couverture sous la chaussée (4 m) et une couverture quasi nulle sous les ouvrages d'assainissement du périphérique, puis, en arrivant sous la commune de Montrouge, sous des immeubles d'habitation. Le CCTP fixe un maximum de tassements de 10 mm sous le boulevard périphérique et de 15 mm sous les immeubles. Au stade de la réponse à l'appel d'offres, le groupement a soumis une variante technique au soutènement provisoire traditionnel en proposant un présoutènement en prédécoupage mécanique et prévoûtes (méthode Perforex, brevet Bec frères). Le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre ont choisi cette solution, qui allie la sécurité de réalisation à la maîtrise des tassements (photo 13).

La prévoûte est une saignée de 4 m de long et de 22 cm d'épaisseur remplie de béton projeté et réalisée dans le terrain à l'avancement.

Cette coque entièrement en compression crée un présoutènement à l'abri duquel est réalisé le terrassement.

Les coques de béton sont disposées en tuiles de telle sorte qu'il y ait toujours du béton au-dessus des opérateurs en tunnel.

La saignée est réalisée par une grande scie montée sur une arche, sur laquelle se déplace également un robot à béton projeté. La seule décompression du terrain est donc liée à l'opération de sciage, réalisée par panneaux successifs, ce qui limite les tassements (photo 14).



12

Une pelle ITC 312 avec double bras (godet + BRH) réalise le terrassement dans les marnes et caillasses et le calcaire grossier (photo 15).

Avant chaque cycle de 10 m, sont effectuées des reconnaissances de sol et une phase de boulonnage des marnes et caillasses avec une foreuse Robodrill équipée d'un bras universel. Le bétonnage définitif est réalisé par plots de 10 m avec un coffrage outil modulable de 7,40 à 7,80 m d'ouverture, le découps entre front de taille et revêtement allant de 25 à 50 m.

#### DES COMPÉTENCES INTÉGRÉES POUR RÉUSSIR UN CHANTIER COMPLEXE

Chaque méthode exposée ci-dessus et prise isolément n'est pas révolutionnaire. La particularité du chantier est qu'elles ont toutes été mises en œuvre de façon simultanée, avec, pour des raisons de planning, tous les fronts actifs en même temps : travaux dans la boucle, travaux à ciel ouvert (jusqu'à quatre ouvrages simultanés), travaux en souterrain (méthode traditionnelle sur deux, voire trois fronts simultanés, et travaux en prévoûte Perforex).

Le chantier n'est pas terminé à ce jour mais, pour faire avancer ensemble toutes ces zones, il a nécessité :

→ Une relation ouverte et réactive entre maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre et groupement ;

→ Une organisation de chantier permettant de fédérer les compétences

12- Coffrage tunnel 1V.  
13- Vue de la haveuse Perforex.  
14- Lame Perforex.

12- 1V tunnel formwork.  
13- View of the Perforex mining machine.  
14- Perforex blade.



13



14



PHOTOS © FRANK BILLON, INGÉNIEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY

15

très diverses des quatre entreprises du groupement ;

→ La mise en commun, au sein du groupement, de l'ensemble des moyens humains et matériels au service du chantier (équipes entièrement intégrées) ;

→ Le recours à un personnel aux multiples compétences ;

→ Un énorme effort en matière de formation du personnel, ainsi qu'en termes de sécurité ;

→ L'appui des services techniques des différentes entreprises membres du groupement (la pertinence du groupement a été maintes fois démontrée) ;

→ Un bureau d'études intégré au groupement (et non sous-traitant) ;

→ Des méthodes établies directement par l'équipe du chantier ;

**15- ITC en cours de terrassement.**

**15- ITC during earthworks.**

→ Un service matériel aux compétences très larges, capable de gérer tous les types et toutes les tailles de matériel, et bénéficiant de l'appui des services matériels des membres du groupement.

Ainsi, depuis 2008, en présentant un vaste choix de techniques de travaux souterrains, ce chantier a fait la joie des nombreux stagiaires qu'il a accueillis. Plusieurs ont même choisi d'y commencer leur carrière d'ingénieur travaux ! □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** RATP

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Xelis

**GROUPEMENT TITULAIRE DU LOT T1 :** Groupement Buss, composé de Bec (mandataire), Urbaine de travaux, Soletanche Bachy et Sotraisol

**BUREAU D'ÉTUDES :** BET travaux souterrains Bec frères

**SOUS-TRAITANTS PRINCIPAUX :** Vialis (déblais), SAS (armatures)

**PRESTATAIRE :** Mire (auscultation automatique)

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**TERRASSEMENT :** 68 000 m<sup>3</sup> dont 4 700 m<sup>3</sup> en carrières

**BÉTON PROJETÉ :** 7 000 m<sup>3</sup>

**BÉTON DE STRUCTURE :** 14 000 m<sup>3</sup>

**BÉTON NON STRUCTUREL :** 1 500 m<sup>3</sup>

### ABSTRACT

#### RATP LINE 4, WORK SECTION T1: A GREAT VARIETY OF METHODS FOR THE EXECUTION OF UNDERGROUND STRUCTURES

VALÉRIE DORE ROQUETA, SOLETANCHE BACHY - BERNARD BIZON, BEC FRÈRES

**Work section T1 for the extension of line 4 of the Paris metro** includes 940 m of underground structures between Porte d'Orléans station (the current terminus) and the future Mairie de Montrouge station. Due to the existence of old underground quarries, the constraints involved in works for connection to RATP metro tracks in operation, the traffic context at one of the busiest entrances to Paris, and the passage under the ring road and then under old buildings in Montrouge, there were numerous facets to this project. This meant that the consortium awarded the contract had to employ numerous underground work methods simultaneously. □

#### RATP LÍNEA 4, LOTE T1: UN CONCENTRADO DE MÉTODOS PARA LA REALIZACIÓN DE OBRAS SUBTERRÁNEAS

VALÉRIE DORE ROQUETA, SOLETANCHE BACHY - BERNARD BIZON, BEC FRÈRES

**El lote T1 de la prolongación de la línea 4 del metro, en París, incluye** 940 metros de obras subterráneas entre la estación Porte d'Orléans (actual estación terminal) y la futura estación Mairie de Montrouge. La presencia de antiguas canteras subterráneas, las sujeciones vinculadas con los trabajos de conexión con las vías RATP en explotación, el contexto de circulación en una de las puertas de acceso a París entre las más cargadas, el paso por debajo de la vía de circunvalación y también por debajo de antiguos edificios en Montrouge dieron múltiples rastros a esta obra. Todo ello ha precisado, por parte de la agrupación adjudicataria la puesta en obra simultánea de números métodos de trabajos subterráneos. □

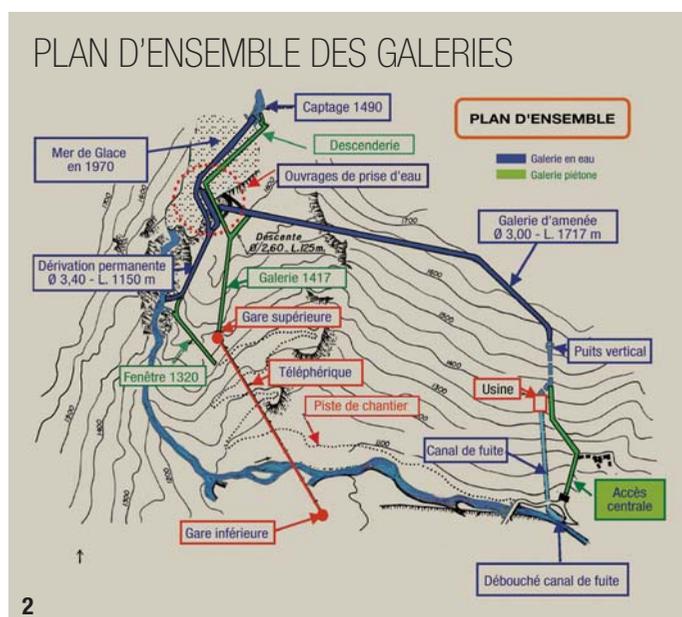
# CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE DES BOIS EN HAUTE-SAVOIE : TRAVAUX D'ADAPTATION SUITE AU REcul DE LA MER DE GLACE

AUTEURS : PATRICK DIVOUX, EDF CIH - LAURENT BUISSART, DANIEL BAFFERT ET PASCAL JOUCHOUX, SPIE BATIGNOLLES TPCI-SOTRABAS

LE REcul ACCÉLÉRÉ DE LA MER DE GLACE, CES DERNIÈRES ANNÉES, EST TEL QUE LE CAPTAGE SOUS-GLACIAIRE DE L'USINE HYDROÉLECTRIQUE DES BOIS A ÉTÉ RATTRAPÉ PAR LE FRONT GLACIAIRE PENDANT L'ÉTÉ 2009. LES ÉTUDES ONT MONTRÉ LE BESOIN D'ADAPTER LE DISPOSITIF DE COLLECTE DES EAUX EXISTANT PAR UN DÉPLACEMENT DU POINT DE CAPTAGE VERS L'AMONT. L'OBJECTIF PRINCIPAL, POUR EDF, EST D'ASSURER LA CONTINUITÉ DU FONCTIONNEMENT DE L'AMÉNAGEMENT DES BOIS. POUR LE GROUPEMENT SPIE BATIGNOLLES TPCI ET SOTRABAS, L'OBJECTIF EST DE METTRE EN SERVICE ET DE RENDRE OPÉRATIONNEL DEUX DISPOSITIFS (UN PROVISOIRE ET UN DÉFINITIF) ASSURANT LA DÉRIVATION DU TORRENT SOUS-GLACIAIRE EN UN POINT DE LA DÉRIVATION PERMANENTE SITUÉ EN AMONT DE LA PRISE D'EAU SOUTERRAINE EXISTANTE. CES TRAVAUX SOUTERRAINS FONT APPEL À DES TECHNIQUES TRADITIONNELLES POUR L'EXCAVATION DANS LE ROCHER (2 700 ML EN CUMULÉ) ET À DES TECHNIQUES PARTICULIÈRES POUR L'EXCAVATION DANS LA GLACE (FONTE DE GLACE À L'EAU CHAUDE).

## CAPTAGE SOUS-GLACIAIRE

La centrale hydroélectrique des Bois, située sur la commune de Chamonix, a été construite entre 1968 et 1974. Elle s'intègre parfaitement au site classé du Mont-Blanc, car les zones visibles de cette installation se limitent à un téléphérique, à la sortie du canal de fuite et à l'entrée de l'usine hydroélectrique. Le reste de l'aménagement est souterrain. Cette centrale est alimentée en eau principalement l'été, par les eaux de fonte du glacier de la Mer de glace et la récupération des eaux d'un bassin versant de quelque 70 km<sup>2</sup>. La particularité de cette centrale réside dans le point de captage d'eau, qui est sous-glaciaire. Deux pays dans le monde disposent d'installations de ce type : la Norvège, qui exploite deux captages sous-glaciaires, et la France, qui turbine les eaux captées sous la Mer de glace et sous le glacier d'Argentière. Les anciens captages sous les glaciers du Tour et de Tré-la-Tête sont devenus aériens. Depuis quelques années, le recul de la Mer de glace s'est accéléré, menaçant le captage sous-glaciaire. Au printemps 2009, le captage existant s'est retrouvé à l'air libre : en quelques épisodes ora-



geux, il a été enseveli sous des chutes de moraines. EDF se devait donc de répondre à un double défi : proposer les travaux d'adaptation nécessaires afin de préserver cette production, tout en maintenant l'aménagement des Bois au plus haut niveau d'intégration environ-

2- Plan d'ensemble des galeries.

2- General layout of the galleries.

nementale. Les études engagées par EDF en 2005 ont abouti à l'élaboration d'un projet de déplacement du point de captage vers l'amont en deux étapes :  
 → Création d'un captage provisoire, début 2009, 150 m en amont du captage d'origine. Celui-ci permet de maintenir en service l'aménagement pendant la période de travaux ;  
 → Création d'un nouveau captage, en cours de construction, positionné environ 1 000 m plus en amont, dont la mise en service est prévue pour avril 2011. Ces travaux d'aménagement consistent principalement à excaver 2 700 ml de galeries cumulées en petite section (environ 10 m<sup>2</sup>) afin de pérenniser le fonctionnement de la centrale pendant les décennies à venir (figure 2).

## LE PLUS GRAND GLACIER FRANÇAIS

La Mer de glace est le plus grand glacier français (et le deuxième des Alpes après celui d'Aletsch, en Suisse), avec ses 12 km de long, 40 km<sup>2</sup> de superficie et 4 milliards de m<sup>3</sup> de glace sur un dénivelé de plus de 2 500 m. Son épaisseur moyenne est de 200 m, mais dépasse 400 m à certains endroits. ▷



## OUVRAGES COMPOSANT LA CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE

### OUVRAGE D'ACCÈS

- Un téléphérique
- Une galerie d'accès vers la prise d'eau et le captage (niveau 1417)
- Un escalier de 314 marches
- Une galerie d'accès à l'usine

### OUVRAGES EN EAU

- Un captage existant à l'altitude 1 490, composé d'une vasque, d'un puits frontal et de deux puits latéraux
- Un puits (longueur 70 m, pente à 100 %) et une galerie de dérivation du torrent sous-glaciaire
- Une prise d'eau située le long de la galerie de dérivation
- Un dégraveur (vaste chambre souterraine qui permet à l'eau turbinée d'être décantée avant de transiter dans la galerie d'amenée)

### 3- Soutènement boulon.

### 4- Foration de volée au pantafore deux bras.

### 5- Fonte de glace type incendie à l'aide d'une lance.

### 3- Bolted retaining structure.

### 4- Blasting round boring by two-armed Pantafore machine.

### 5- Melting ice with a fire hose type nozzle.

Comme tous les glaciers, la Mer de glace vit et bouge constamment.

Elle avance de 90 m par an tout en reculant du fait de la fonte de glace ; c'est un matériau vivant et visqueux. Cet admirable panorama attire chaque année plus de 500 000 touristes.

Il est aussi, depuis 1870, très surveillé par les scientifiques et fait l'objet de nombreuses études.

Après une période de stabilisation entre 1970 et 1990, le recul du glacier s'est progressivement accéléré.

En 2005, l'épaisseur de glace au droit du captage était encore de 50 m.

Fin 2008, le captage apparaît à l'air libre. Au fil des ans, le glacier a apporté et déposé en rive droite une quantité importante de moraines.



6- Hélicoptage de l'avant du charge-et-roule.

6- Helicopter transport of the front of the mobile loader.

PHOTOS © PASCAL TOURNIAIREPHOTO THEQUE EDF

Au fur et à mesure du recul glaciaire, ces moraines s'effondrent en fond de vallée.

### FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE

La centrale des Bois produit de l'électricité principalement l'été, lorsque la fonte du glacier et les précipitations offrent des débits d'eau suffisants. 95 % de la production de la centrale est fournie pendant sept mois, de mai à novembre. En été, en l'absence de grande capacité de stockage (telle que la retenue d'un barrage, par exemple), la centrale fonctionne au fil de l'eau (turbinage en continu des apports). Le débit d'équipement est de 15 m<sup>3</sup>/s. Tous les débits au-delà ne sont pas

utilisés et sont restitués directement dans l'Arveyron. Durant l'été 2009, le débit maximum a été de 40 m<sup>3</sup>/s environ. En hiver, lorsque les débits sont faibles, un régime d'écluse est mis en place en utilisant le volume des galeries d'amenée et du dégraveur comme réserve de stockage d'eau. Les études de faisabilité ont été engagées en 2005. La solution retenue à l'issue de l'avant-projet sommaire consiste à réaliser un nouveau captage sous-glaciaire environ 1 000 m en amont du captage existant. Début 2008, l'avant-projet détaillé est finalisé et EDF décide d'engager les travaux avec l'objectif de mettre en service un nouveau captage en avril 2011. Les études d'impact et l'instruction des dossiers administratifs sont menées

en parallèle. Les travaux sont réalisés dans le site classé du Mont-Blanc. EDF apporte une attention particulière à la protection de l'environnement et aux impacts notamment paysagers. EDF travaille également en partenariat avec le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE) de Grenoble, pour l'ensemble des études liées au glacier.

### RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES

Plusieurs campagnes de reconnaissances géophysiques de type sismiques (sismique réflexion THR) et radar, des sondages à l'eau chaude et des sondages carottés depuis la surface du glacier ont été réalisés au cours de

l'été-automne 2006, à l'automne 2007, en octobre 2009 et, enfin, en avril 2010. Le but de ces reconnaissances est d'identifier la topographie du socle rocheux dans la zone du futur captage. Ces reconnaissances se heurtent néanmoins aux difficultés techniques suivantes : la précision des résultats des campagnes géophysiques est insuffisante, et il est difficile d'identifier la présence d'un sillon ou d'une couche importante de moraine sous le glacier. Il est donc important de prévoir un programme de reconnaissances complémentaires dans le cadre des travaux à partir d'un point d'accès sous-glaciaire permettant d'explorer le contact glace-rocher et de localiser exactement la position du torrent sous-glaciaire. ▷



### TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Une série de travaux préparatoires a été entreprise entre janvier et décembre 2008. Les sept opérations préparatoires consécutives menées en 2008 étaient toutes sur le chemin critique. Elles étaient indispensables pour démarrer des travaux principaux en décembre 2008 et répondre à l'objectif de mettre en service un captage provisoire en avril 2009. Les travaux de génie civil, réalisés par le groupement Spie Batignolles TPCI et Sotrabas, comprenaient :

- La réalisation d'une série de niches (compresseur, ventilateur, treuil) dans la galerie d'accès au captage historique (altitude 1 417 m) pour laisser de la place aux travaux principaux ;
  - La dépose d'une ancienne porte étanche (porte P1), remplacée par une porte plus large afin de disposer d'un espace suffisant pour accéder au torrent sous-glaciaire ;
  - L'excavation d'une galerie de marouflage (longueur 144 m, diamètre 3 m) afin de créer un accès à l'extérieur du glacier ;
  - La mise en place de filets pare-blocs à l'extérieur de la galerie de marouflage (entreprise HC Rhône Alpes).
- Les travaux de mécanique-électricité comprenaient quant à eux :
- La réhabilitation du téléphérique (divers travaux d'électricité-automatisme), qui devient l'accès au chantier ;
  - La remise à niveau d'un monte-charge de la descenderie ;
  - Le changement du transformateur électrique et la mise en place d'un départ électrique 20 000 V (entreprise Spie).

### TRAVAUX PRINCIPAUX

Le marché des travaux principaux actuellement en cours consiste à réaliser :

- Un captage provisoire (longueur 200 m, diamètre 3 m, pente 18 %) afin d'alimenter la centrale pendant la durée des travaux ;

→ Une galerie de reconnaissance (longueur 1 000 m, diamètre 3 m, pente 10,5 %) avec l'objectif de déboucher sous la glace le plus en amont possible. Cette galerie sera le futur accès pour le personnel de maintenance de la centrale ;

→ Une galerie de dérivation permanente (longueur 1 000 m, diamètre 3,4 m, pente 8 %) ;

→ Un nouveau captage constitué d'une vasque sous-glaciaire, un ensemble de pertuis et un puits permettant le raccordement entre la vasque et le collecteur définitif ;

→ Des travaux de reconnaissances du socle sous-glaciaires (fonte de glace) pendant les périodes hivernales ;

→ Des travaux de génie civil divers (porte étanche, bouchon béton, réfectoire en galerie, blindage...).

### UN PLANNING RYTHMÉ PAR LES SAISONS DE FONTE DE GLACE

La durée du marché s'étend entre le 22 octobre 2008 et le 31 décembre 2011. Les deux dates clés du chantier correspondent à la mise en eau du captage provisoire (15 avril 2009) et à la mise en service du nouveau captage (15 avril 2011).

La réalisation du projet est jalonnée par des délais contractuels correspondant à des phases importantes de chantier (débouché sous-glaciaire de la galerie de reconnaissance, saisons de fonte de glace, livraisons de locaux divers, mise en place de portes étanches ou de bouchons béton...). L'excavation « rocher » a lieu pendant toute la durée des travaux, en été comme en hiver, et ce 24 heures sur 24, sept jours sur sept, depuis le 5 janvier 2009.

En revanche, l'excavation dans la glace a lieu uniquement en hiver, période pendant laquelle les débits d'eau sous-glaciaire sont limités.

**7- Débouché sous-glaciaire de la galerie de reconnaissance, confortement HEB 100.**

**8- Vue du glacier depuis la gare haute du Montenvert.**

**7- Subglacial outlet of the reconnaissance gallery, HEB 100 consolidation.**

**8- View of the glacier from the high station of Montenvert.**

Au-delà du 15 avril, les accès sous-glaciaires sont protégés par des portes étanches ou des bouchons béton pour éviter que les crues sous-glaciaires ne provoquent des dommages sur les installations.

Les équipes travaux sont constituées de 50 personnes environ, y compris l'encadrement de chantier.

### CADRE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Le massif du Mont-Blanc se compose de deux grandes unités pétrologiques : des roches plutoniques (le granite du Mont-Blanc) et des roches métamorphiques (gneiss principalement).

Le sommet du Mont-Blanc se situe d'ailleurs au contact de ces deux unités. Le granite passe d'une position intrusive dans les gneiss au sud-ouest à un contact tectonique au nord-est, par le biais de la faille de l'Angle.

Il est à noter que, dans son avancée, le glacier agit tel un robot : il polit les

## PHASAGE DE RÉALISATION DU PROJET

**DÉCEMBRE-JUIN 2009** : Installation de chantier ;

**JANVIER-AVRIL 2009** : Réalisation et mise en eau du captage provisoire (excavation roche et fonte de glace, saison 1) ;

**AVRIL-DÉCEMBRE 2009** : Réalisation de la galerie de reconnaissance (excavation roche) ; avancement de la galerie de dérivation permanente en temps masqué ;

**DÉCEMBRE-AVRIL 2010** : Reconnaissances sous-glaciaires (fonte de glace, saison 2) à partir du débouché de la galerie de reconnaissance ; identification de la topographie de la future zone du captage définitif, reconnaissance du torrent et définition du projet de captage final (géométrie finale) ;

**JANVIER-DÉCEMBRE 2010** : Creusement du collecteur définitif, y compris creusement d'un puits de mise en charge ;

**DÉCEMBRE-AVRIL 2011** : Fonte de glace, saison 3, dérivation du torrent sous-glaciaire, réalisation du nouveau captage ;

**AVRIL-SEPTEMBRE 2011** : Travaux de génie civil divers, réalisation d'un réfectoire, repli de chantier.



9



10

PHOTOS © PASCAL TOURNAIRE/PHOTOTHÈQUE EDF

parois rocheuses et transporte des blocs de moraines. Les terrains excavés appartiennent aux massifs cristallins externes des Alpes ; ce sont des roches métamorphiques représentées uniformément, pour l'ensemble des galeries, par des gneiss de couleur gris-vert (schistes cristallins). Ces gneiss sont grenus à structure migmatitique.

Leur composition minérale est constituée de quartz, plagioclase, feldspath potassique, chlorite, muscovite et grenat. La présence majoritaire de silice explique la forte abrasivité de la roche ainsi que sa dureté.

Malgré l'histoire tectonique complexe de l'ensemble, la roche apparaît peu fracturée avec une schistosité parallèle à la stratification et deux familles de joints constants (subverticale plus ou moins dans l'axe des galeries principales et subhorizontale). Ces familles de joints influencent fortement le découpage des galeries à l'explosif et

**9- Terrassement pendant les travaux préparatoires.**

**10- Préparation d'un hélicoptère au Super Puma.**

**9- Earthworks during the preparatory works.**

**10- Preparation for Super Puma helicopter transport.**

le support à mettre en place avec des phénomènes d'écaillage et les hors-profil géologiques associés.

Pour le support, le principe de base adopté est le suivant (photo 3) :

→ Support par boulons locaux et/ou treillis à la demande ;

→ En zones hydrauliques ou bétonnées ou déjà boulonnées (galerie permanente), utilisation des boulons traditionnels type HA 18 mm ;

→ En zones non bétonnées et visitées (galerie d'accès, réfectoire, reconnaissance), utilisation de boulons à coquille injectée (marque Minova).

Lors du creusement du collecteur définitif, qui se situe exactement sous le talweg de la vallée (contrairement à la galerie de reconnaissance qui se situe sur le flanc en rive gauche), des phénomènes d'écaillage imposent une veille constante du personnel. Cela se traduit, selon les zones, par des purges régulières du terrain ou par la pose systématique de boulons et de grillage.

tofore pour les excavations de niche et les travaux de boulonnage (photo 4). L'explosif utilisé sur le chantier est un explosif pompable de type Morse® (Module de repompage et de sensibilisation d'explosifs produit par la société Nitro-Bickford).

Au-delà des aspects sécurité et gain de temps lors du chargement, le choix de ce type d'explosif a été motivé par la simplicité de stockage et d'approvisionnement dans ce site d'accès difficile.

L'amorçage est réalisé à l'aide de détonateurs non-électriques et de cordeau détonant. Les cadences moyennes sont d'environ 30 ml/semaine.

#### GALERIE DE RECONNAISSANCE

Le débouché sous-glaciaire de la galerie de reconnaissance a eu lieu le 27 novembre 2009, conformément au délai contractuel.

En raison de l'incertitude régnant sur la topographie du socle rocheux, l'excavation du débouché a nécessité un soutènement de type cintres HEB 100 + tôles de blindage + coque en béton de 50 cm d'épaisseur, afin de soutenir une épaisseur de moraines de 3 m environ.

La glace découverte dans cette zone étant très chargée en blocs et en sable, le débouché sous-glaciaire ainsi que les premiers mètres d'excavation dans la glace ont été incertains.

L'évacuation des déblais est réalisée à l'aide de charge-et-roule. Le marinage est ensuite soit transporté jusqu'à la sortie de la galerie de marinage (creusée pendant les travaux préparatoires), soit, en période estivale, lorsque les débits d'eau sont suffisamment importants pour transporter le marin, rejeté dans le torrent sous-glaciaire.

La part du marinage hydraulique a été évaluée à 5 à 10 % de l'ensemble des matériaux charriés naturellement par le torrent sous-glaciaire.

## OUVRAGES COMPOSANT LA CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE

### OUVRAGE D'ACCÈS

- Un téléphérique
- Une galerie d'accès vers la prise d'eau et le captage (niveau 1417)
- Un escalier de 314 marches
- Une galerie d'accès à l'usine

### OUVRAGES EN EAU

- Un captage existant à l'altitude 1 490, composé d'une vasque, d'un puits frontal et de deux puits latéraux
- Un puits (longueur 70 m, pente à 100 %) et une galerie de dérivation du torrent sous-glaciaire
- Une prise d'eau située le long de la galerie de dérivation
- Un dégraveur (vaste chambre souterraine qui permet à l'eau turbinée d'être décantée avant de transiter dans la galerie d'amenée)

#### CONTRAINTES LIÉES

##### À LA SECTION ET À L'ISOLEMENT

Les sections à excaver étant relativement étroites (entre 3 et 3,4 m de diamètre), les engins de chantier peuvent se croiser uniquement dans des aires prévues à cet effet. Cette contrainte de gabarit impose l'utilisation de petits engins : mini-pantofore, charge-et-roule de petites dimensions, mini-manuscopic... Compte tenu du poids, le matériel de galerie a été acheminé au niveau du chantier par un hélicoptère de type Super Puma.

L'excavation des 2 700 m<sup>3</sup> de galerie est réalisée de manière traditionnelle à l'explosif.

La foration se fait à l'aide d'un pantofore électrique (marque Robodrill) monté sur pneus employé uniquement pour l'avancement du front. Le chantier dispose également d'un deuxième pan-

Les zones bétonnées se limitent au radier de la galerie de reconnaissance, au radier de roulement du collecteur définitif et aux ouvrages de génie civil en galerie (locaux, porte étanche, bouchons béton...). Le béton est approvisionné sur chantier sous forme sèche en big bag (fournisseur Mapei).

Une centrale à béton souterraine a été installée spécialement pour le chantier. La réalisation de béton de génie civil au contact de l'eau du torrent nécessite l'emploi d'un ciment CHF. Les autres bétons (locaux, radiers) sont réalisés avec du ciment type CPA.

### TRAVAUX DE BLINDAGE

Au niveau des ouvrages de prise d'eau ainsi qu'au niveau des captages (provisoire et définitif), l'eau circule à plus grande vitesse et nécessite l'installation de blindages métalliques et la mise en place de béton de type Fondag® (société Kermeos). Les tôles métalliques sont en durstell 410 et 510 ; cette tôle résiste à des conditions d'abrasion sévères à très sévères et sa limite élastique élevée lui permet d'encaisser des chocs importants sans déformation. Le béton Fondag® est spécialement destiné aux environnements les plus agressifs nécessitant une résistance à l'abrasion, à l'érosion, aux impacts mécaniques, à la corrosion chimique, aux températures élevées ou aux chocs thermiques répétés. Il doit son exceptionnelle résistance à la combinaison de granulats synthétiques Alag® avec un liant d'aluminates de calcium spécialement conçu pour faciliter la mise en œuvre.

### MÉTHODE D'EXCAVATION DANS LA GLACE

Trois saisons hivernales de fonte de glace sont prévues pendant la durée du chantier. Les travaux consistent à reconnaître le socle rocheux afin de positionner au mieux les captages. Ces travaux sous-glaciaires s'articulent autour de la reconnaissance de la topographie du socle rocheux, de sa nature (roche, moraine, sable...) et de la position du torrent. La confrontation sous-glaciaire avec les reconnaissances préalables réalisées depuis la surface du glacier sont menées par EDF avec des glaciologues et des guides de haute montagne (photo 5).

La fonte de glace est réalisée par projection d'eau chaude sur la glace chauffée à une température de 37°C en bout de lance avec une pression de 5 bars environ pour un débit total de 600 l/mn réparti entre plusieurs lances. Les galeries creusées ont un diamètre de 3 m

environ et nécessitent un réalésage régulier car les convergences y sont très importantes. En effet, les grottes excavées se referment d'environ 20 cm par jour sous le poids et l'avancée du glacier. Durant l'hiver 2009-2010 (trois mois de travaux), 600 m de grottes sous-glaciaires ont été excavées sept jours sur sept et 24 heures sur 24.

### CREUSEMENT DE LA VASQUE ET DÉRIVATION DU TORRENT

Le captage à réaliser est constitué d'une vasque sous-glaciaire. Celle-ci s'apparente à un caniveau de 3 m de hauteur et 4 m de large qui coupe le glacier afin de recueillir les eaux du torrent. Le raccordement de la vasque sur le collecteur est réalisé grâce à des rameaux de connexion appelés pertuis, équipés de section de contrôle en blindage métallique afin de stopper les gros blocs de moraines qui sont naturellement charriés par le glacier (photo 1). Une fois que la vasque est terminée, ainsi que les pertuis, la dérivation du torrent peut être démolie : l'eau circule ainsi dans le collecteur.

Au début des travaux, le chantier a dû faire face à un manque de place en galerie et à l'extérieur de la plateforme de marinage. L'objectif étant de mettre le collecteur provisoire en eau le 15 avril 2009, les installations ont été réalisées en deux phases : une phase provisoire et une phase définitive.

### UNE LOGISTIQUE DÉLICATE

La logistique sur le chantier est un poste crucial. Les approvisionnements sont réalisés quotidiennement par les deux moyens suivants : soit à l'aide du téléphérique + transport dans la galerie d'accès à 1 417 m d'altitude puis utilisation d'un monte-charge ; soit à l'aide d'un hélicoptère de type Ecureuil B3 (charge utile 900 kg, photo 6). Exceptionnellement, pour les périodes d'installation et de repli de chantier, l'utilisation d'un hélicoptère de type Super Puma s'est imposée pour des questions de charge utile (3 500 kg max, photo 10). Ces limites ont également imposé le démontage et remontage de tous les engins de chantier en début et fin de chantier, ainsi que l'adaptation de tous les colisages de chantier (big bag, cubitainer...).

Enfin, l'utilisation du téléphérique est soumise à de nombreux contrôles (installation régie par le Bureau départemental des remontées mécaniques). L'ensemble du personnel a été formé à la conduite du téléphérique (conduite + essai d'évacuation de la benne).



11



12

PHOTOS © PASCAL TOURNAIER/PHOTO THÈQUE EDF

**11- Téléphérique d'accès au chantier.**

**12- Roue Pelton au niveau de la centrale des Bois.**

**11- Cable car for access to the site.**

**12- Pelton wheel at the level of Les Bois power station.**

### DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ

L'accès au chantier depuis la station basse du téléphérique se fait à pied, en 30 minutes environ, dans des conditions délicates (téléphérique, 800 m de galerie à parcourir à vélo ou à pied, puis un escalier de 314 marches).

En étroite collaboration avec la médecine de travail de Sallanches, l'ensemble du personnel a subi des tests d'effort en cabinet médical et in situ (cardiofréquence, souffle). La situation du chantier impose, en cas d'accident, l'intervention du PGHM (Peloton de gendarmerie de haute montagne de Chamonix). Afin de mieux appréhender un éventuel secours ou la gestion d'un incendie en tunnel, des tests ont été entrepris avec le PGHM et les pompiers de Chamonix. Ces tests d'évacuation ont été réalisés dans des conditions météorologiques défavorables (plafond bas, impossibilité d'utiliser l'hélicoptère).

et ont confirmé l'isolement du chantier en matière de secours. Des mesures particulières ont été prises : formation de nombreux SST, installation d'une porte coupe-feu, mise en place de nombreuses lances incendie et rideaux d'eau, installation d'un système de détection incendie type ERP...).

Un espace de survie en cas de conditions météorologiques trop mauvaises (impossibilité d'utiliser le téléphérique et l'hélicoptère) a également été aménagé en galerie.

Malgré les difficultés d'accès, la langue terminale de la Mer de glace est empruntée quotidiennement par les skieurs de la vallée Blanche en hiver et par des randonneurs en été. En début de chantier (février à juin 2009), cela a imposé une étroite collaboration entre les boute-feux et les guides de montagne pour interrompre le passage des skieurs sur une pente jugée instable avant chaque tir de mine.

#### EXPLOITATION DE LA CENTRALE

Durant les travaux d'excavation, la centrale hydroélectrique reste en exploitation. Le pilotage des organes de la centrale (vanne de chasse, vanne batardeau, ouverture des injecteurs d'eau au niveau de la turbine) se fait automatiquement et à distance. La présence du personnel exploitant d'EDF ainsi que l'intervention de quelques entreprises de maintenance des ouvrages sont coordonnées par le maître d'oeuvre. Une co-activité importante a lieu en période hivernale. En effet, entre février et mars, alors que le débit d'eau est de 1 à 2 m<sup>3</sup>/s, la centrale est arrêtée pour des travaux de maintenance.

Les équipes de chantier supervisent donc les travaux de blindage métallique, de bétonnage dans les ouvrages habituellement en eau et de purge de galeries existantes. Dans la même période, EDF entreprend des travaux de mécanique divers (changement de joints sur vannes, changement de la roue Pelton, réparation de soudure au niveau des injecteurs d'eau...).

#### UN DOUBLE DÉFI

Face au recul de la Mer de Glace et au risque de boucher le captage sous-glaciaire de la centrale hydro-électrique des Bois, EDF se devait donc de répondre à un double défi : pérenniser la production électrique de cette centrale tout en maintenant l'aménagement des Bois au plus haut niveau d'intégration environnementale.

Ces travaux représentent un enjeu de taille pour la production hydroélectrique. La centrale des Bois produit chaque année 113 GWh, ce qui représente la consommation de 50 000 habitants (équivalent à une ville comme Annecy). 100 % renouvelable, cette production permet à la France une économie de plus de 100 000 tonnes de CO<sub>2</sub>/an.

Ce chantier est un défi en termes de conception, de technique et de logistique. En termes de conception, les reconnaissances font partie intégrante des travaux. Les galeries sont réorientées et les ouvrages dimensionnés à l'avancement en fonction des reconnaissances. Techniquement, les spécificités de ce chantier résident dans la réalisation de galeries de petite section en traditionnel, avec des cadences soutenues, la mise en place de méthodes

d'excavation spécifiques dans la glace, ainsi qu'une liaison étroite entre la conception du projet et sa réalisation. D'un point de vue logistique, l'isolement

du site, combiné à un univers de haute montagne, fait des manutentions et de l'acheminement du personnel sur chantier un poste clé du projet. □

## PRINCIPAUX PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES

**RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SIMPLE (RC) : 125 MPa**

**RÉSISTANCE À LA TRACTION (RTB) : 10 MPa**

**ABRASIVITÉ CERCHAR : 4,5 (très abrasif)**

**DURETÉ CERCHAR : 65 (dure)**

**TENEUR EN SILICE (SiO<sub>2</sub>) : 65 %**

**MASSE VOLUMIQUE : 2,72 g/cm<sup>3</sup>**

**VITESSE SONIQUE : 4 135 m/s**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : EDF (unité de production Alpes)**

**MAÎTRE D'ŒUVRE ET COORDONNATEUR SPS :**

**EDF, Centre d'ingénierie et d'hydraulique du Bourget du Lac**

**ENTREPRISES : Groupement Spie Batignolles TPCI et Sotrabas**

**EXPLOSIFS : Nitro-Bickford**

**MATÉRIELS : Sandvik, Robodrill, Aramine**

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**EXCAVATIONS ROCHEUSES : 27 000 m<sup>3</sup> (dont 2 700 m<sup>3</sup> de puits et galeries en cumulé, Ø 3,2 et 3,4 m, et 4 000 m<sup>3</sup> d'excavations sous-glaciaires)**

**TRAVAUX DE FONTE DE GLACE ET RECONNAISSANCES SOUS-GLACIAIRES : 6 000 h**

**BÉTON : 3 000 t**

**SOUTÈNEMENT : 75 t**

**BLINDAGE : 21 t**

**PÉRIODE DES TRAVAUX : Mars 2008 à décembre 2011**

#### ABSTRACT

### LES BOIS HYDROELECTRIC POWER STATION IN THE HAUTE-SAVOIE REGION: ADAPTATION WORKS FOLLOWING THE RETREAT OF THE MER DE GLACE GLACIER

PATRICK DIVOUX, EDF CIH - LAURENT BUISSART, DANIEL BAFFERT, PASCAL JOUCHOUX, SPIE BATIGNOLLES TPCI-SOTRABAS

*In recent years, the Mer de Glace glacier has retreated so rapidly that the subglacial intake of the Les Bois hydroelectric power plant was caught up by the ice front during the summer of 2009. Studies showed the need to adapt the existing water collection system by shifting the catchment point upstream. The main objective, for French electricity board EDF, is to ensure the continuity of operation of the Les Bois scheme. For the Spie Batignolles TPCI and Sotrabas consortium, the objective is to commission and render operational two systems (one temporary and one permanent) diverting the subglacial torrent at a permanent diversion point located upstream of the existing underground water intake. These underground works make use of traditional techniques for excavation in the rock (a total of 2,700 linear metres) and special techniques for excavation in the ice (melting ice with hot water). □*

### CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE LES BOIS EN ALTA-SABOYA: TRABAJOS DE ADAPTACIÓN COMO CONSECUENCIA DEL ALEJAMIENTO DEL MAR DE HIELO

PATRICK DIVOUX, EDF CIH - LAURENT BUISSART, DANIEL BAFFERT, PASCAL JOUCHOUX, SPIE BATIGNOLLES TPCI-SOTRABAS

*El alejamiento acelerado del Mar de hielo, estos últimos años, es tan importante que la captación bajo el glaciar de la planta hidroeléctrica de Les Bois se ha acercado del frente de hielo durante el verano de 2009. Los estudios vinieron a demostrar la necesidad de adaptar el dispositivo actual de transporte de las aguas por un desplazamiento del punto de captación hacia la parte superior. El objetivo principal, para EDF, consisten en garantizar la continuidad del funcionamiento de las instalaciones de Les Bois. Para la agrupación Spie Batignolles TPCI y Sotrabas, el objetivo es poner en servicio y en estado operativo dos dispositivos (un provisional y un definitivo) que permiten la derivación del torrente bajo el glaciar hacia un punto de la derivación permanente ubicada aguas arriba de la captación de agua subterránea existente. Estos trabajos subterráneos recurren a diversas técnicas convencionales para la excavación en la roca (2.700 metros acumulados) y a técnicas particulares para la excavación en el hielo (fundición de hielo mediante agua caliente). □*

# CSM BESSAC EXPORTE SON SAVOIR-FAIRE

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

SPÉCIALISÉE DANS LA CONSTRUCTION D'OUVRAGES SOUTERRAINS DE 500 MM À 5 M DE DIAMÈTRE, LA SOCIÉTÉ CSM BESSAC CONSOLIDE, AU FIL DES ANS, SA PRÉSENCE À L'EXPORT. QUE CE SOIT COMME CONSTRUCTEUR DE MATÉRIEL AVEC LA VENTE DE TUNNELIERS EN RUSSIE, COMME ENTREPRENEUR EN ALGÉRIE OU AVEC UN CONTRAT D'ASSISTANCE TECHNIQUE À MEXICO, SUR UN GROS CHANTIER D'ASSAINISSEMENT, LA FILIALE TECHNIQUE DE SOLETANCHE-BACHY A TROUVÉ LÀ UN AXE DE DÉVELOPPEMENT IMPORTANT QUI CONFORTE SON STATUT DE SPÉCIALISTE RECONNU.



1- Galerie de diamètre 3,20 m à Hong Kong.

1- Gallery 3.20 m in diameter in Hong Kong.

## 15 ANS D'EXPÉRIENCE À L'EXPORT

C'est à Berlin que CSM Bessac avait réalisé, en 1995, son premier chantier à l'export. Il s'agissait de creuser une galerie technique de 6 km de long et 3 m de diamètre pour des câbles haute tension (Bewag). Ce chantier avait été réalisé conjointement avec les équipes de Solétanche-Bachy, maison mère de l'entreprise toulousaine.

Trois tunneliers avaient été mis en œuvre (deux à pression de boue et un à pression d'air) pour réaliser cet ouvrage dans des terrains difficiles : des sables ouverts avec présence de très nombreux boulders sous une charge d'eau allant jusqu'à 30 m. Depuis ces premiers pas outre-Rhin, c'est près de 30 chantiers qui ont été réalisés hors de France pour une centaine de kilomètres d'ouvrages. L'activité à l'export varie,

selon les années, entre 30 et 40 % du chiffre d'affaires total (60 M€ en 2009). Les marchés gagnés sont bien sûr le reflet de l'activité de l'entreprise. Rappelons que celle-ci est positionnée sur le marché des ouvrages souterrains pour l'assainissement principalement, pour le transport d'eau et les galeries techniques.

La gamme de diamètre s'étend de 500 mm à 5 m. Les ouvrages sont réa-

lisés au microtunnelier ou au tunnelier. Rappelons également que CSM Bessac intervient sur ce marché comme constructeur de matériels de creusement et comme entrepreneur. Parmi les pays qui ont accueilli les équipes de CSM Bessac, on peut citer le pays de Galles, l'Espagne, le Chili, la Suisse, la Russie, l'Argentine, la Chine, la Roumanie, les États-Unis, la Colombie, le Maroc, l'Algérie et le Mexique.



2



3



4

**2- Démarrage du creusement de la galerie Tsz Wan Shan au pied des tours à Hong Kong.**

**3- Descente en puits du microtunnelier à Rabat (Maroc).**

**4- Sortie du tunnelier EPB à Fountain Valley (États-Unis).**

**2- Start of excavation of the Tsz Wan Shan gallery at the foot of the towers in Hong Kong.**

**3- Lowering the micro-tunnelier in a shaft in Rabat (Morocco).**

**4- EPB tunnel boring machine coming out at Fountain Valley (United States).**

**DU MAROC À HONG KONG**

À Rabat, au Maroc, CSM Bessac a construit un émissaire de rejet en mer. L'ouvrage, de 2 m de diamètre et 800 m de long, a été réalisé par fonçage au microtunnelier dans des calcarénites et des sables (photo 3). Aux États-Unis, dans la banlieue de Los Angeles (Orange County), l'entreprise a réalisé un ouvrage de 1 700 m de long et 2,70 m de diamètre creusé avec un tunnelier à pression de terre ; le revêtement primaire était constitué de cintres et de bastinges (photo 4). En Espagne, à Alicante, elle a réalisé une galerie de drainage qui permet l'alimentation d'une usine de dessalement. Le tunnelier à confinement par air comprimé a creusé cet ouvrage dans des grès sous 15 m de charge d'eau, sur 1 000 m de long, sous la plage, parallèlement à la côte. À Hong Kong, elle a construit deux galeries de diamètre 3,20 m pour le passage de câbles haute tension. La particularité de ce chantier résidait dans la diversité de la géologie sur les deux galeries, qui ont été réalisées avec le même tunnelier, un modèle à attaque ponctuelle et confinement par air comprimé. La première galerie a été creusée sous un bras de mer, dans des

argiles molles avec présence de blocs aux deux extrémités, avec une charge d'eau de 23 m, la seconde dans des arènes granitiques avec d'importantes remontées du substratum granitique sur la totalité du front (photos 1 et 2).

**RÉALISATION D'UN COLLECTEUR À ALGER**

Ces dernières années, l'entreprise s'est tournée vers des chantiers importants dont les montants sont généralement supérieurs à 50 millions d'euros. Il s'agit souvent de marchés de conception-construction, une pratique peu courante en France pour des marchés d'assainissement, qui nécessitent la mise en place de moyens d'étude et d'encadrement importants. Les chantiers en cours de réalisation se trouvent actuellement en Algérie, à Hong Kong, au Mexique, et en Colombie. À Alger, CSM Bessac réalise un collecteur unitaire de diamètre 4 m afin de dédoubler le collecteur Oued M'Kacel. Il s'agit d'un marché de conception-construction qui comprend, outre le creusement du tunnel, long de 4 300 m, excavé au tunnelier à pression de terre, la réalisation de nombreux puits de connexion de 30 à 60 m de profondeur, un ouvrage de diffusion en mer et un ouvrage cadre à ciel ouvert (figure 7). Parallèlement à ce collecteur pluvial vient de se terminer un autre chantier, le creusement du collecteur Pointe Pescade quatrième tranche, pour les eaux usées, de diamètre 2,50 m et de longueur 3 500 m.

**UN TUNNEL DE TRANSFERT À MEXICO**

À Mexico, l'entreprise participe actuellement au plus gros projet de tunnel d'assainissement jamais réalisé. Il s'agit du Tunnel emisor oriente (TEO), un tunnel de transfert (150 m³/s) pour les eaux usées et pluviales de 62 km de long et 7,80 m de diamètre intérieur. Situé entre 30 et 100 m de profondeur, l'ouvrage est creusé par six tunneliers à pression de terre. La société mexicaine Carso a acquis la réalisation de deux lots de 10 km. Elle a fait appel à CSM Bessac pour l'assister dans la réalisation de ses deux lots (3 et 4). Le contrat d'assistance technique, démarré au printemps 2010, devrait durer 24 mois.

**EXTENSION DU MÉTRO DE HONG KONG**

À Hong Kong, la joint-venture Draga-ge-Maeda-Soletanche-Bachy a gagné, fin 2009, un appel d'offres lancé par ▷



5



6

la société du métro de Hong Kong, MTR, qui portait sur la réalisation d'une extension vers l'ouest de la ligne Island Line. Ce premier lot de travaux (C703) comprend le creusement de quatre tunnels de 5,30 m de diamètre. Deux sont réalisés à l'explosif, deux autres sont creusés au tunnelier à pression de boue. Le projet comprend par ailleurs la démolition préalable d'un tunnel d'arrière-gare existant sur la trajectoire du nouveau tunnel creusé par le tunnelier. CSM Bessac, qui participe à ce projet via Soletanche-Bachy, travaille actuellement, en partenariat avec les membres de la joint-venture et du client MTR, à la conception et à la fabrication d'une machine spécifique qui assurera la démolition des voussoirs de ce tunnel sous confinement (3 bars) et son remplissage au béton. (Voir article page 32).

**PROGRAMME D'ASSAINISSEMENT EN COLOMBIE**

En Colombie, en 1999, l'entreprise a répondu avec succès à un appel d'offres

concernant les premiers collecteurs d'un important programme d'assainissement de la capitale, Bogotá. La technique de creusement au tunnelier en sol meuble est alors inconnue dans le pays, et le marché de conception-construction remporté, l'Interceptor río Bogotá, concerne plus de 10 km de collecteurs de 2,20 m, 2,45 m et 2,75 m de diamètre. La technique de mise en œuvre proposée par CSM Bessac est le fonçage horizontal avec creusement au tunnelier à pression de terre et marinage pâteux. En effet, la plaine alluviale de Bogotá renferme des terrains argileux dont les caractéristiques permettent le pompage sur de grandes longueurs (photo 6). Ainsi, l'entreprise réalisera de véritables performances en creusant cet ouvrage de plus de 10 km de long en seulement dix mois avec deux tunneliers. Certaines journées de production ont dépassé les 80 m d'ouvrage creusés par machine. Autre performance, la longueur des tronçons de tuyaux foncés entre deux puits : jusqu'à 1 300 m avec des courbes,

**5- Tunnelier à pression de terre DN 1600 à Bogotá (Colombie).**

**6- Arrivée du tunnelier DN 2750, Interceptor Tunjuelo bajo, Bogotá (Colombie).**

**7- Tracé du collecteur Oued M'Kacel à Alger (Algérie).**

**5- EPB tunnel boring machine of ND 1600 mm in Bogota (Colombia).**

**6- Arrival of the 2750 mm ND TBM, Interceptor Tunjuelo bajo, Bogota (Colombia).**

**7- Route of the Wadi M'Kacel main drain in Algiers (Algeria).**

ce qui constitue un record sur le continent américain. CSM Bessac transposera plus tard cette expérience sur le marché français avec la réalisation de plusieurs fonçages d'1 km de long avec des courbes (Lyon, Le Havre, Nîmes). Forte de ce succès, l'entreprise participera en 2007 à un nouvel appel d'offres lancé par le même maître d'ouvrage, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Le marché de conception-construction est à nouveau remporté (Interceptor Fucha-Tunjuelo). Le tunnel de 3,75 m de diamètre intérieur (voussoirs en béton armé) et 9 400 m de long a été inauguré au début de l'année 2010. Il a été réalisé avec un tunnelier à pression de terre, en deux tronçons à partir d'un puits central. La longueur importante de chaque tunnel a imposé la mise en œuvre d'une logistique adaptée, avec notamment un puits de 40 m de long pour la vidange et le croisement des trains de marinage. Cela a permis de creuser l'ouvrage avec des rendements importants : jusqu'à 800 m par mois.





Les terrains sont des argiles sableuses sous la nappe (photos 8 et 9). Un troisième chantier sera gagné quelque temps plus tard : l'Interceptor Tunjuelo-Bajo. Celui-ci, toujours en cours, comprend la construction de 8 300 m de collecteur de diamètre 2,20 et 2,45 m, par fonçage avec creusement au tunnelier à pression de terre. Ce marché comprend également 516 m de collecteur de diamètre 1 600, réalisé par la même technique, et 2 200 m de collecteur de diamètre 600 mm mis en œuvre par microtunnelier.

**CRÉATION D'UNE FILIALE LOCALE**  
 Cette réussite, tant technique que commerciale, a convaincu l'équipe dirigeante de l'opportunité de se tourner non seulement vers des affaires importantes, traitées en chantiers dits « commando », mais aussi vers un marché naissant et soutenu d'affaires plus modestes. Pour cela, il a été décidé de se doter d'une entité locale dédiée à la réalisation de collecteurs par microtunnelier. Une filiale a donc été

**8- Montage d'un voussoir de diamètre 3,75 m, Interceptor Fucha-Tunjuelo, Bogotá (Colombie).**  
**9- Tunnel de diamètre 3,75 m, Interceptor Fucha-Tunjuelo, Bogotá (Colombie).**

**8- Erection of a segment of diameter 3.75 m, Interceptor Fucha-Tunjuelo, Bogota (Colombia).**  
**9- Tunnel of diameter 3.75 m, Interceptor Fucha-Tunjuelo, Bogota (Colombia).**

créée en 2009, Bessac Andina. Celle-ci prévoit, en 2010, un chiffre d'affaires de 10 millions d'euros, avec plusieurs chantiers en cours et 5 km de collecteurs de diamètre 600 à 1 600 déjà réalisés au microtunnelier (photo 5). C'est donc en Colombie que CSM Bessac a le mieux concrétisé sa démarche de

diversification à l'export. En dix ans, 35 km d'ouvrages y ont été réalisés, et l'équipe commerciale attend le résultat d'un appel d'offres pour la ville de Medellin concernant 6 600 m de collecteur de diamètre 2,50 m au microtunnelier. L'aventure colombienne continue. □

## LES BONNES ASSOCIATIONS

Une telle réussite à l'export ne s'est pas faite sans un apprentissage quelquefois difficile. Chaque pays a ses propres contraintes, qui s'ajoutent à celles de ces travaux complexes. Les équipes doivent s'assurer une autonomie salutaire pour la gestion des difficultés rencontrées. Cependant, cette réussite n'aurait pas été possible sans une stratégie d'association avec des acteurs locaux de la construction et/ou avec des représentations locales de la maison mère Solétanche-Bachy. Celle-ci, fortement implantée à l'international, apporte le plus souvent un appui commercial et contractuel, une logistique locale et une complémentarité technique pour les travaux spéciaux (parois moulées, injections...). CSM Bessac apporte son savoir-faire, mais aussi la richesse de son parc de tunneliers et de microtunneliers (30 machines).

## ABSTRACT

### CSM BESSAC EXPORTS ITS KNOW-HOW

JEAN-NOËL LASFARGUE, CSM BESSAC

**A specialist in the construction of underground structures of diameters ranging from 500 mm to 5 m, CSM Bessac has, over the years, consolidated its presence in export markets. Whether it be as an equipment manufacturer, selling tunnel boring machines in Russia, as a contractor in Algeria or on a technical assistance contract in Mexico City, on the largest sanitation project in the world, this engineering subsidiary of Soletanche-Bachy has found here a major growth area which confirms its status as a recognised specialist. □**

### CSM BESSAC EXPORTA SUS CONOCIMIENTOS TÉCNICOS

JEAN-NOËL LASFARGUE, CSM BESSAC

**Especializada en la construcción de obras subterráneas de 500 mm a 5 m de diámetro, la empresa CSM Bessac consolida, en el transcurso de los años, su presencia en la esfera internacional. Ya sea como constructor de material con la venta de tuneladoras en Rusia, como empresa en Argelia o bien con un contrato de asesoramiento técnico en México, en la obra de saneamiento más importante del planeta, la filial técnica de Soletanche-Bachy ha encontrado un fuerte eje de desarrollo que consolida su estatuto de especialista reconocido. □**