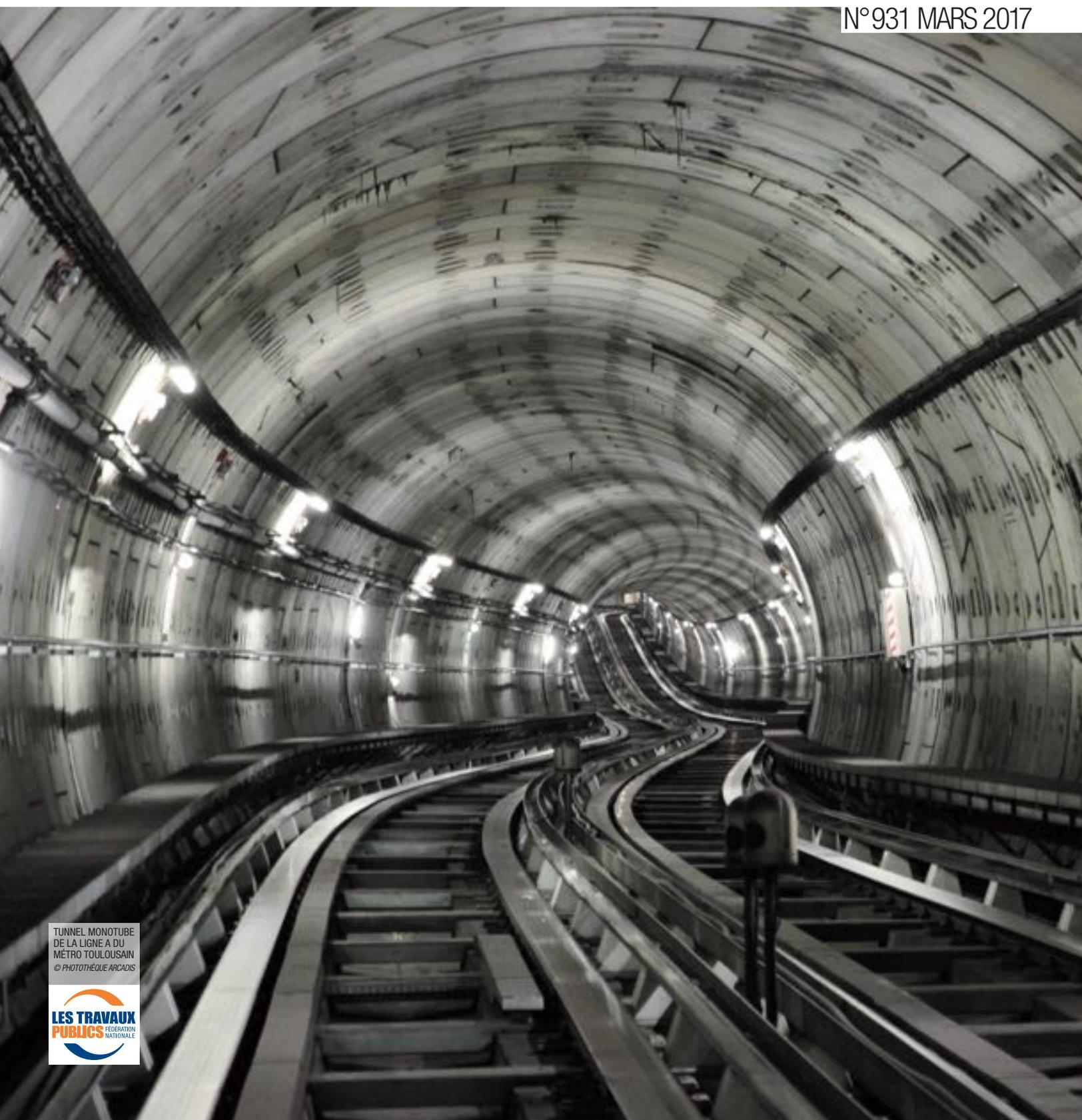


TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

TRAVAUX SOUTERRAINS. LE TUNNEL DE LA BORNE ROMAINE SECURISE L'A8. RN19 - CHANTIER DE PAROIS MOULEES. DOUBLEMENT DE LA CAPACITE LIGNE A METRO TOULOUSE. LIGNE D TRAMWAY STRASBOURG - TREMIE ET PONT. TUNNELIER PRESSION DE TERRE - RETOURS D'EXPERIENCE. GALERIE DE RECONNAISSANCE DU LYON-TURIN. STATION MAIRIE-D'AUBERVILLIERS - LABORATOIRE D'INNOVATIONS. PREMIER PARKING MUTUALISE QUARTIER DE LYON CONFLUENCE. MOBYDIC. ARNCLIFFE PEDESTRIAN LINK

N°931 MARS 2017



TUNNEL MONOTUBE
DE LA LIGNE A DU
METRO TOULOUSAIN
© PHOTO THEQUE ARCADIS



EXPERTS EN FONDATIONS SPÉCIALES

www.fayat-fondations.com

Directeur de la publication**Bruno Cavagné****Directeur délégué****Rédacteur en chef****Michel Morgenthaler**

3, rue de Berri - 75008 Paris

Tél. +33 (0)1 44 13 31 03

morgenthalerm@fnfp.fr

Comité de rédaction

Sami Bounatirou (Bouygues tp), Erica Calatizzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fnfp), Laurent Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar (Eiffage tp), Florent Imbert (Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis), Véronique Mauvisseau (Ingerop), Stéphane Monleau (Soletanche Bachy), Jacques Robert (Arcadis), Claude Servant (Eiffage tp), Philippe Vion (Vinci Construction Grands Projets), Nastaran Vivan (Artelia), Michel Morgenthaler (Fnfp)

Ont collaboré à ce numéro**Rédaction**

Monique Trancart, Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente**Com et Com****Service Abonnement TRAVAUX**

Bât. Copernic - 20 av. Edouard Herriot

92350 Le Plessis-Robinson

Tél. +33 (0)1 40 94 22 22

Fax +33 (0)1 40 94 22 32

revue-travaux@cometcom.fr

France (9 numéros) : 190 € TTC

International (9 numéros) : 240 €

Enseignants (9 numéros) : 75 €

Étudiants (9 numéros) : 50 €

Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)

Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)**Publicité****Rive Média**

2, rue du Roule - 75001 Paris

Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44

contact@rive-media.fr

www.rive-media.fr

Directeurs de clientèle**Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04**

b.cosson@rive-media.fr

Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05

c.reinger@rive-media.fr

Site internet : www.revue-travaux.com**Édition déléguée****Com'1 évidence****Siège :**

101, avenue des Champs-Élysées

75008 PARIS

Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52

revuetravaux@com1evidence.com

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 by 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°0218 T 80259

ISSN 0041-1906

LE BEL AVENIR DES TUNNELS



© DR

Soutenir l'économie et préserver l'environnement : voilà sans doute deux des enjeux qui préoccupent le plus nos concitoyens, qui structurent l'action politique et qui dynamisent les entreprises « responsables ».

Si ces deux objectifs sont parfois considérés comme antinomiques, les ouvrages souterrains permettent de les réconcilier.

L'attractivité des métropoles est en grande partie liée à la facilité d'y accéder facilement et de s'y déplacer rapidement, et dans des conditions de confort acceptables. Or, compte-tenu de l'encombrement du sol, la mobilité ne peut s'y développer que sous terre, et avec des transports en commun qui minimisent l'énergie consommée pour se déplacer. Le projet Crossrail est bien avancé à Londres et les premiers contrats de travaux du Grand Paris sont attribués. Plus loin, d'autres chantiers se poursuivent : Riyad, Doha, Singapour... Et d'autres ne manqueront pas de prendre le relais aux quatre coins du monde.

À l'échelle continentale, les marchandises aussi devront être transportées demain en consommant le moins possible d'énergie. Ainsi, pour franchir une chaîne de montagnes, l'époque est à la construction de tunnels dits « de base », seule solution pour aller au plus court sans avoir à lutter contre la pesanteur. En ce moment, ce sont les Alpes qui sont en train d'être percées. Nos voisins suisses ont montré la voie. L'ouvrage du Saint-Gothard, record du monde de longueur inauguré le 1^{er} juin dernier, est entré en exploitation le 11 décembre, avec la mise en service du nouvel horaire sur les chemins de fer Suisses.

Il sera complété par le tunnel du Ceneri et a été précédé par le tunnel de base du Lötschberg ouvert en 2007 sur l'itinéraire du Simplon. Mais l'Italie ne se contentera pas de ces deux passages centraux vers le nord. Elle cofinance deux autres ouvrages transfrontaliers. À l'est, le tunnel sous le col italo-autrichien du Brenner, dont la construction est en cours. À l'ouest le tunnel de base du Mont-Cenis, clé de voûte de la nouvelle liaison ferroviaire Lyon-Turin, elle-même au centre du corridor méditerranéen du réseau central de transport de l'union européenne. Actuellement, les deux chantiers de reconnaissance et la maîtrise d'ouvrage représentent d'ores et déjà 800 emplois directs. Bien avancée des deux côtés des Alpes, la ratification parlementaire de l'accord binational va permettre d'engager les travaux principaux prochainement.

Comme en témoignent les articles que vous allez découvrir, ces grands chantiers sont des aventures passionnantes. Construire sous terre est toujours un défi qui réserve une part d'imprévu, qui conduit à développer des machines impressionnantes d'ingéniosité, mais aussi des contrats et des montages opérationnels innovants. La faisabilité et l'acceptation des projets nécessitent une grande vigilance dans des domaines très variés, trop souvent négligés par le passé : porter toute l'attention aux équilibres hydrogéologiques, considérer les matériaux extraits comme une ressource, veiller à l'intégration rationnelle dans un réseau de transport... D'une manière plus générale, faire comprendre les enjeux au public et lui faire partager l'aventure sont des aspects essentiels de la conduite de ces projets ; il s'agit non pas d'éviter toute opposition, mais au moins de lever les malentendus, de chercher la transparence et de contribuer au développement et à la qualité des territoires.

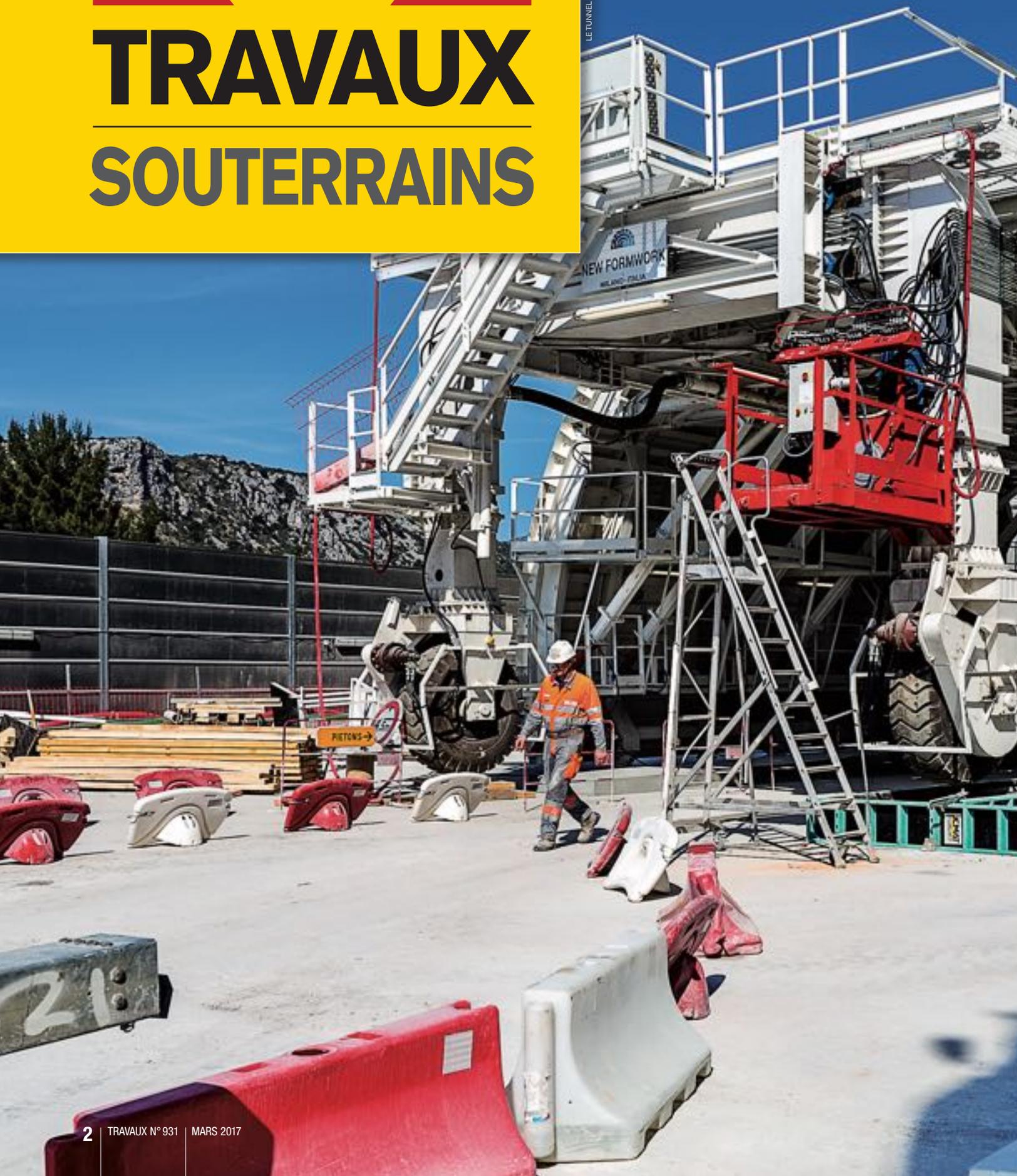
Autant de sujets sur lesquels œuvrent les équipes de TELT, comme celles des autres maîtres d'ouvrage nationaux, avec à leur côté des ingénieries et des entreprises parmi les plus compétentes au monde.

HUBERT DU MESNIL

PRÉSIDENT DE TUNNEL EURALPIN LYON TURIN

TRAVAUX SOUTERRAINS

LE TUNNEL DE LA BORNE ROMAINE SÉCURISÉ L'A8 © RITHIDETH KI



04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



18

**ENTRETIEN AVEC
FRÉDÉRIC LAUNEAU**
CIGÉO : LA SOLUTION LA PLUS SÛRE
SUR LE TRÈS LONG TERME

**24 HDI : LE FORAGE DIRIGÉ SOUS HAUTE
EXPERTISE**



32

**LE TUNNEL
DE LA BORNE ROMAINE
SÉCURISE L'A8**



38

RN19
Un chantier de parois moulées
innovant et de grande ampleur



45

**LIGNE A DU MÉTRO
DE TOULOUSE**
Doublement de la capacité



52

**LIGNE D DU TRAMWAY
DE STRASBOURG**
Construction d'une trémie et
d'un pont sous les voies ferrées
du port autonome



58

**TUNNELIER
PRESSION DE TERRE**
Retours d'expérience



62

**GALERIE DE
RECONNAISSANCE
DU LYON-TURIN**
Entre les descenderies de Saint-
Martin-la-Porte et La-Praz



68

**LA STATION
MAIRIE-D'AUBERVILLIERS**
Laboratoire d'innovations



74

**PREMIER PARKING
MUTUALISÉ**
Dans le quartier
de Lyon Confluence



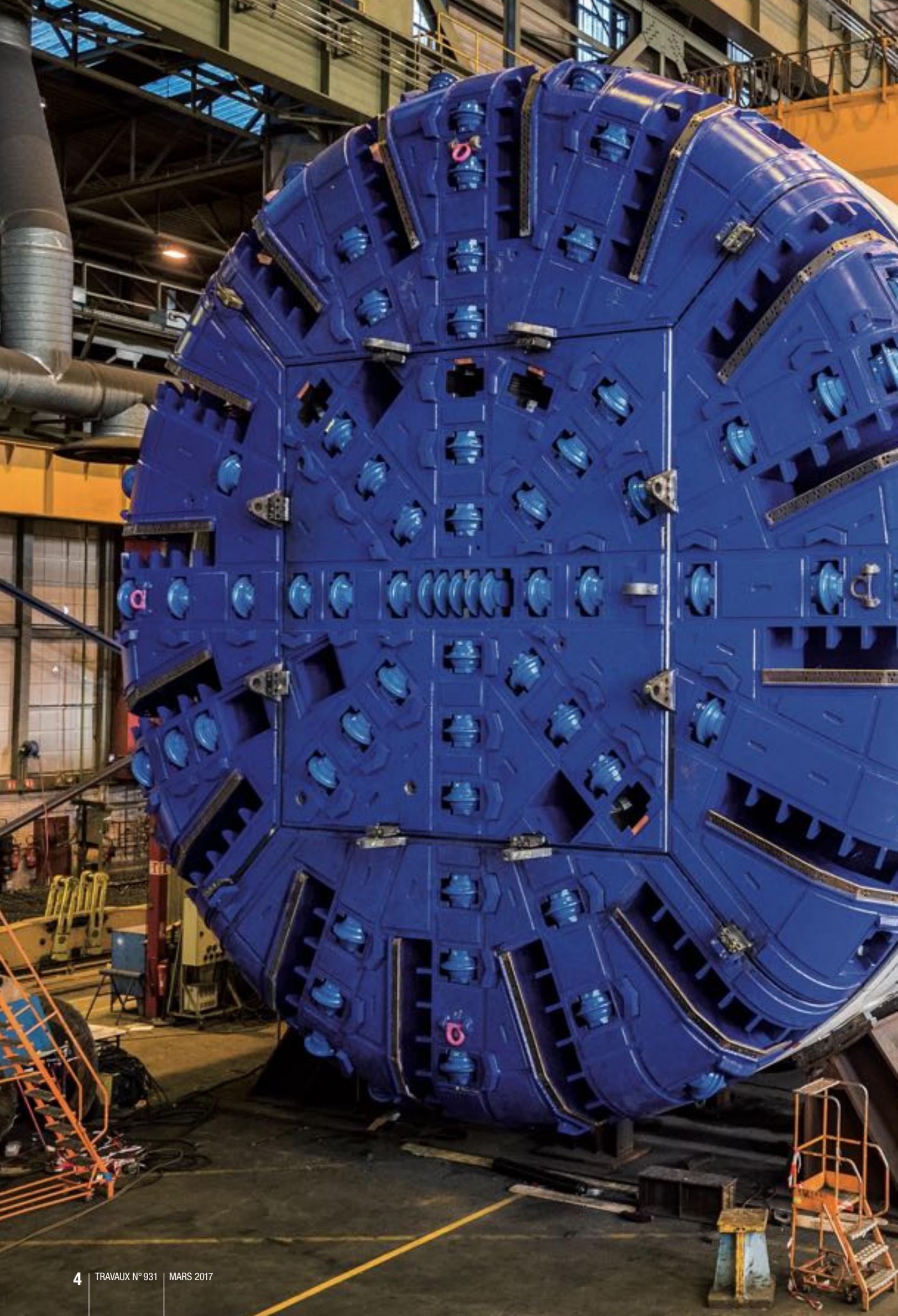
82

MOBYDIC
L'œil du pilote
sur le front de taille



92

**ARNCLIFFE
PEDESTRIAN LINK**
Un tunnel foré à trois mètres
sous quatre voies ferrées





TUNNEL DU LYON-TURIN FERROVIAIRE. UN RECORD EN VUE

LE TUNNEL ferroviaire du Saint-Gothard, ouvert en 2016, détient, avec 57,1 km, le record mondial actuel de longueur dans la catégorie. Celui du Lyon-Turin aura une longueur de 57,5 km. Dans les deux cas il s'agit de bitubes dits "de base" présentant de faibles déclivités adaptées aux trains à grande vitesse, d'où leur grande longueur. La nouvelle ligne entre Lyon et Turin reliera deux régions européennes des plus dynamiques comptant 11 millions d'habitants : Rhône-Alpes et le Piémont. (Voir l'éditorial page 1 et l'article page 62).



LES TUNNELS TRANSALPINS RIVALISENT DE LONGUEUR

La Suisse, d'un côté, l'Italie et l'Autriche, de l'autre, ont lancé des projets de traversée souterraine nord-sud des Alpes. En Suisse, le tunnel du Saint-Gothard est ouvert, celui du Ceneri le sera en 2020. Le tunnel du Brenner sera mis en service en 2026.



Le tunnel du Saint-Gothard de 57 km a ouvert en décembre mais atteindra son plein régime en 2020.

Le tunnel du Saint-Gothard (Suisse), de 57 km, a été mis en service en décembre. À pleine mesure, en 2020, il accueillera 50 trains de voyageurs par jour à 250 km/h maximum, et jusqu'à 5 trains de marchandises par heure et par sens, selon les pages horaires, à 160 km/h. Le massif du Gothard culmine à 3 196 m. La ligne existante, à 1 100 m d'altitude avec un tunnel de 15 km, conserve une vocation touristique.

L'ouvrage ferroviaire, associé au tunnel du Ceneri de 15,4 km, plus au sud, et à la création d'un corridor de 4 m, au nord, raccourcit le trajet nord-sud entre Bâle et Lugano (Suisse) et en augmente les capacités.

En 2019-2020, tout l'axe sera ouvert et aura été adapté au transport sur wagons

de semi-remorques de 4 m de haut par 2,60 m de large.

Les travaux du Saint-Gothard ont duré plus de dix-sept ans. L'idée de traverser les Alpes suisses du nord au sud remonte à 1947. Le projet prend forme dans les années 1980-1990. La société Alp Transit Gotthard, filiale des Chemins de fer fédéraux suisses, est chargée de le réaliser. Le tunnel du Saint-Gothard relie Erstfeld au nord, à Bodio au sud, en quatre tronçons. Chacun d'eux est relié à une gare de la ligne touristique et cette liaison sert de point d'entrée pour creuser le tunnel, soit trois accès.

→ Le train peut quitter le tunnel

Aux environs de l'accès de Sedrun, le tunnel se trouve surmonté d'une épaisseur de roches jusqu'à 2 300 m. Parmi

les moyens de compenser les charges sur les parois, citons la mise au point d'un complexe de renforcement constitué du support initial avec béton projeté (20 cm maximum) recouvert d'une couche d'étanchéité sur laquelle est projetée un autre béton de 30 cm à base principalement de débris de roche excavée. En temps normal, le tunnel du Saint-Gothard n'est pas ventilé. Le passage des trains crée un appel d'air suffisant. En cas d'accident ou d'incendie, la ventilation se met en route. Selon la situation, le train quitte le tunnel en rejoignant les liaisons ferroviaires de Sedrun et Faido. Quand ce n'est pas possible, les voyageurs sont conduits vers une gare d'arrêt d'urgence ou évacués à proximité dans le second tube du tunnel par 176 galeries transversales et pris en charge par un autre train. Un train pompiers stationne aux deux entrées du tunnel (nord et sud). La température dans le tunnel avoisine naturellement les 35°C, en toutes saisons.

→ Ceneri : extension prévue

Quant à la sécurité incendie du tunnel du Ceneri, elle est plus simple. Pas de centrale de ventilation. Cinquante ventilateurs, accrochés en tête et au milieu, renouvellent l'air ou extraient les fumées. Les voyageurs se réfugient dans le second tube grâce aux 46 galeries transversales.

Le tunnel sous le Ceneri relie Vigana à Vezia (Suisse). En travaux depuis 2006, son creusement s'est terminé en janvier 2016. L'installation de l'infrastructure

ferroviaire commence. Des dispositions ont été prises pour faciliter une extension au nord et au sud.

Les chantiers du Gothard et du Ceneri génèrent 36 millions de tonnes de déblais, en tout. Une bonne partie a été réutilisée pour fabriquer du béton sur site, grâce à des recherches universitaires et industrielles. Les terres inutilisables ont été envoyées par train et bateau à Chicago (États-Unis) pour créer des plages sur le lac Uri.

→ 25 projets connexes

L'adaptation au transport de semi-remorques de la ligne de chemin de fer au nord du Gothard, entre Erstfeld et Bâle, dite "corridor de 4 mètres", génère 25 projets dont 13 de tunnels, à construire ou à rénover, et des élargissements de gabarit de gares et ponts.

Le tunnel du Saint-Gothard aura coûté 9 milliards d'euros, celui du Ceneri est estimé à 2,6 milliards.

www.alptransit.ch/fileadmin/dateien/media/publikationen/atg_broschuere_e_2012_lq.pdf ■



Entrée nord du tunnel du Ceneri, à Vigana (Suisse).

TUNNEL DU BRENNER, ENTRE ITALIE ET AUTRICHE

À vol d'oiseau, 230 km séparent le tunnel du Saint-Gothard en Suisse de celui du Brenner, entre Italie et Autriche. Les deux se situent au cœur de la chaîne des Alpes et raccourcissent les distances en train à travers l'Europe.

La mise en service du tunnel du Brenner est attendue pour 2026, sur l'axe Munich (Allemagne)-Vérone (Italie). La liaison souterraine court sur 55 km d'une traite, de Fortezza au nord de Bolzano (Italie) jusqu'à Innsbruck (Autriche), en passant sous le col du Brenner (1 371 m).

En ajoutant le tunnel existant du contournement de la capitale du Tyrol, l'ensemble atteint 64 km.

Les travaux du tunnel exploratoire ont débuté en 2007. De 6 m de diamètre, il est creusé sur 55 km, entre les deux futurs tubes mais 12 m plus bas. Il servira ensuite au drainage et à la logistique.

© BBT



Le tunnel du Brenner est construit par une société mi-autrichienne, mi-italienne. Ici, côté autrichien, à 5 km d'Innsbruck.

Les tunnels principaux ont commencé à être creusés en 2012, côté italien.

→ 8,8 milliards d'euros

L'Autriche et l'Italie ont créé en 2004 une société publique chargée du projet et de

sa réalisation, la Brenner Basis Tunnel SE (société européenne), détenue par la Compagnie autrichienne de chemins de fer (50%), et par une holding italienne (50%), Tunnel Ferroviario del Brennero, regroupant le Réseau de chemin de fer italien (87%), les régions autonomes de Bolzano et de Trento, et la province de Vérone.

Un consortium mené par Salini Impregilo (Italie) et Strabag (Autriche) a commencé les 2 premiers lots : 6 km côté Fortezza dont les passages sous la rivière Isarco et 37 km à l'approche d'Innsbruck.

Montant estimé du tunnel : 8,8 milliards d'euros (2016). ■

LES COLLECTIVITÉS LOCALES S'IMPLIQUENT PLUS DANS LES ÉNERGIES RENOUVELABLES



Plus de 150 m² de capteurs photovoltaïques en toiture d'une halle neuve à Magny-Cours (Nièvre).

La Fédération nationale des collectivités concédantes et régies⁽¹⁾ a cofinancé le 7^e baromètre des énergies électriques renouvelables avec l'Observatoire des énergies renouvelables (Observ'ER) et l'Agence de la maîtrise de l'énergie et de l'environnement. La FNCCR fait partie des dix membres fondateurs d'Observ'ER, association créée en 1979 et qui bénéficie de fonds européens pour élaborer et porter à connaissance gratuitement un baromètre européen des énergies renouvelables, l'Euroobserv'ER. La FNCCR n'est pas une nouvelle venue dans l'énergie puisqu'elle représente, depuis 1934, les autorités organisatrices du service public de l'énergie que sont les collectivités locales, propriétaires de

réseaux dont ceux de distribution d'électricité, de gaz et de chaleur. Elles peuvent, depuis les deux lois Grenelle⁽²⁾, développer des actions en faveur de la maîtrise de l'énergie et intervenir dans le domaine de la production par des sources renouvelables. La loi n°80-531 du 15 juillet 1980 les avait autorisées à créer et gérer un réseau de chaleur alimenté par des déchets.

→ Le bon maillon

La bonne volonté des collectivités en faveur des énergies renouvelables se confronte au nombre d'acteurs et à des procédures compliquées. La FNCCR veut être experte auprès d'elles. « La loi de transition énergétique d'août

2015⁽³⁾ a accéléré l'implication des collectivités dans l'énergie, » observe Pascal Sokoloff, directeur général de la FNCCR. « Cette loi a l'avantage d'imposer un calendrier à tout le monde, ajoute Vincent Jacques Le Seigneur, président d'Observ'ER. Le maillon des collectivités territoriales est le bon pour les énergies renouvelables. » Clotilde Carron, chargée de mission développement durable à la FNCCR, précise : « Les collectivités mettent en relation consommation et production sur leur territoire. L'argent tiré des énergies renouvelables peut être réinvesti dans la maîtrise de l'énergie sur ce territoire. »

→ Développer les réseaux de froid

Les collectivités locales investissent aussi dans les réseaux de chaleur (biomasse dans la Loire, géothermie en Île-de-France, etc.) et les réseaux électriques intelligents. « Les smart grids permettent d'ajuster demande d'électricité et fourniture, souligne Pascal Sokoloff. Les collectivités sont très impliquées dans ce domaine, par exemple le Morbihan et les Hautes-Alpes. Nous voulons également travailler sur les réseaux de froid à cause de la hausse des températures liée au changement climatique. » ■

⁽¹⁾ Officiellement "Services publics locaux de l'énergie, de l'eau, de l'environnement et des e-communications".

⁽²⁾ Lois n°2009-967 du 3 août 2009 et n°2010-788 du 12 juillet 2010, compétences inscrites dans le code général des collectivités locales.

⁽³⁾ Loi n°2015-992 du 17 août 2015. Cf. *Travaux* octobre 2015, n°918, page 9.

ÉOLIENNES FLOTTANTES EN MÉDITERRANÉE

Deux projets de ferme d'éoliennes flottantes ont remporté l'appel du ministère de l'Environnement, en novembre. Les deux commenceront à produire de l'électricité en 2020.

Le premier site, à 17 km au large de Leucate, au sud de Narbonne (Aude), va recevoir 4 turbines GE-Alstom de 6 MW pièce. Elles sont portées par un flotteur Windfloat de Principal Power. Ces très grosses éoliennes sont construites en partie à quai à Fos-sur-mer (Bouches-du-Rhône), par Eiffage Métal. Elles sont remorquées en mer sans recourir à des bateaux spéciaux.

Une fois à l'emplacement voulu, elles sont raccordées à leurs 3 jambes d'ancrage, ici à 70 m de profondeur. Si une opération de maintenance lourde s'avérait nécessaire, elles seraient désancrées et tirées pour être réparées à quai, opération moins chère qu'en pleine mer. Partenaires : Engie, EDP Renewables (Energias de Portugal), la Caisse des dépôts, Eiffage, Principal Power et GE. Le second site se trouve aussi en Méditerranée, à 17 km au large de Port-Saint-Louis-du-Rhône, au sud d'Arles (Bouches-du-Rhône). Y seront installées 3 éoliennes flottantes Siemens de 8 MW unité.

Projet piloté par EDF Energies nouvelles avec Siemens, SBM Offshore en partenariat avec IFP Energies nouvelles.



Éolienne à quai sur ses flotteurs.

7^e BAROMÈTRE DES RENOUVELABLES ÉLECTRIQUES

Le baromètre 2016 des énergies renouvelables électriques en France a été publié en janvier* par Observ'ER.

Le document de 192 pages a pour ambition de faire comprendre le secteur, énergie hydraulique incluse, et s'adresse à tout public. Il décrit les dynamiques territoriales, celles des entreprises et de l'Ademe. Il contient une fiche par filière d'électricité renouvelable et une par région avec une liste des acteurs dont les porteurs de financement participatif des habitants. Il propose une synthèse nationale et un état d'avancement des énergies renouvelables.

Téléchargeable en tout ou partie sur www.energies-renouvelables.org/energie-renouvelable-france.asp.

* Chiffres à fin septembre 2016.

46 MILLIARDS POUR LE RÉSEAU FERRÉ

Le conseil d'administration de SNCF Réseau a approuvé le projet de contrat de performance avec l'État de 46 milliards d'euros sur dix ans. La signature définitive interviendra après avis de l'Autorité de régulation des activités ferroviaires et routières, notamment sur les aides financières à ce plan. Objectif : un réseau plus performant pour rétablir l'équilibre financier du regroupement RFF-SNCF (loi n°2014-872 portant réforme ferroviaire). Le réseau le plus fréquenté - TGV et Intercités - est doté de 34 milliards d'euros dont 27,9 de renouvellement, 4,5 de mise en conformité (passages à niveaux, accessibilité) et 1,8 en investissements (engins, informatique, etc.). Les lignes régionales et les nœuds ferroviaires reçoivent 12 milliards d'euros pour leur rénovation, avec participation des régions (contrats de plans État-Région).

Six régions sont devenues autorités organisatrices de lignes de train d'équilibre du territoire, en 2016 : Normandie, Grand-Est, Nouvelle-Aquitaine, Hauts-de-France, Occitanie-Pyrénées-Méditerranée et Centre-Val de Loire.

L'entreprise prévoit d'économiser 1,2 milliard d'euros grâce à plus de performance interne, des plages de travaux nocturnes plus longues, et des relations de long terme avec ses fournisseurs.

TRAVAUX PRÈS DES RÉSEAUX

L'arrêté du 27 décembre 2016 portant sur les travaux à proximité des réseaux remplace la partie 1 de la norme NF S70-003 par un nouveau guide d'application de la réglementation anti-endommagement.

Source : ministère de l'Environnement et Observatoire national DT DICT.

LES PRODUCTEURS DE GRANULATS POURSUIVENT LEURS EFFORTS MALGRÉ LA CONJONCTURE



© CERF

Bassin de recyclage des eaux à Saint-Loup (Allier).

Colas Midi-Méditerranée a abaissé la quantité de matériaux rejetés lors de la production de granulats à la carrière de Sainte-Colombe-de-la-Commanderie (Pyrénées-Orientales).

Ces stériles étaient dus à une forte présence d'argile. Pour les réduire, l'industriel a ajouté de la chaux dans le traitement, avec un dosage automatique selon l'humidité des matériaux.

Cette solution a valu à l'entreprise de recevoir le prix innovation de l'Union nationale des producteurs de granulats (UNPG) en 2016⁽¹⁾. Autre exemple, celui de Cerf, également distinguée par l'UNPG : elle réutilise ses eaux de lavage à plus de 98%, sur son site de Saint-Loup (Allier).

Les producteurs de granulats commencent à voir leurs efforts reconnus.

En 2016, ils ont obtenu que les carrières, en fin de vie, puissent être des lieux de compensation vis-à-vis de la biodiversité, en application de la loi du 8 août 2016.

→ Impliqués dans les schémas régionaux de carrières

Le secteur a également progressé en matière de concertation locale et il s'engage à mieux informer le public, à le faire participer davantage, conformément à l'ordonnance du 3 août dernier. Cela améliore la confiance vis-à-vis de leur activité, donc sert ses intérêts.

La profession s'implique beaucoup dans les schémas régionaux de carrières, en place à partir de 2020. Ils remplaceront les schémas départementaux, conformément à la loi Alur⁽²⁾ et devraient donner lieu à simplifications.

L'échelle régionale vise, notamment, à mieux articuler les documents d'urbanisme et les accès aux gisements.

Actuellement, les deux s'avèrent parfois incompatibles.

Autre intérêt : les plates-formes de recyclage de déchets de démolition pourront être prévues dans un schéma de cohérence territoriale et figurer au plan local d'urbanisme.

→ Défenseurs des petites lignes de train

Les producteurs de granulats ont revalidé avec l'État leur stratégie vis-à-vis de la biodiversité - études et recherches - pour la période 2017-2019.

L'UNPG défend le transport fluvial et le ferré. Elle collabore avec les céréaliers pour maintenir les petites lignes de train.

Elle met en œuvre des mesures pour faire baisser toujours plus les accidents sur ses sites.

Enfin, « nous prenons le bon chemin pour valoriser 70% des déchets du bâtiment et des travaux publics d'ici 2020, » assure Arnaud Colson, président. ■

⁽¹⁾ Cf. *Travaux* n°927, octobre 2016, page 7.

⁽²⁾ Loi pour l'accès au logement et à un urbanisme rénové, n°2014-366.



© CERF

Lavage des roues de camion en sortie de carrière.

PRODUCTION 2017 EN LÉGÈRE HAUSSE

23% des granulats consommés en France proviennent du recyclage. Au total, en 2014, 426 millions de tonnes de matériaux minéraux étaient consommés par le BTP dont 77 réutilisés sur chantier, 19 recyclés venant de l'extérieur (plates-formes) et 4 issus de la valorisation de déchets industriels (houille, hauts-fourneaux, aciéries).

La production de granulats des 2 500 carrières pourrait croître de 2% en 2017, après une année 2016 stable, et 2015, en recul de 7%.



**PRO BTP,
LE MEILLEUR DE LA
PROTECTION SOCIALE**

SANTÉ
PRÉVOYANCE
RETRAITE
ÉPARGNE
ASSURANCES
ACTION SOCIALE
VACANCES

 **PRO BTP**
GROUPE

DÉBLAIS DE GYPSE EN CARRIÈRES

Placoplatre va remblayer 4 carrières avec des déblais du Grand Paris Express. L'entreprise du groupe Saint-Gobain s'y est engagée fin janvier auprès de la Société du Grand Paris. Ces carrières vont recevoir 4 millions de tonnes de déblais contenant du gypse. Deux sont à ciel ouvert : Le Pin-Villeparisis (Seine-et-Marne) et Cormeilles-en-Parisis (Val-d'Oise). Deux sont souterraines : Bernouille (Seine-Saint-Denis) et Montmorency (Val-d'Oise).

Le remblayage des carrières souterraines a lieu alors qu'elles sont en exploitation. La première étape consiste à recouvrir la base des piliers - 7 m de côté - des chambres d'extraction (jusqu'à 17 m de haut). Sur la plate-forme ainsi formée, les engins comblent jusqu'au plafond.

PARIS-ROISSY EN VINGT MINUTES

Le train qui reliera Paris à l'aéroport de Roissy en vingt minutes sera mis en service en 2023 à partir de la Gare de l'Est, selon la loi n°2016-1887 du 28 décembre. Grâce à cette loi, une société de projet, filiale de SNCF Réseau et d'Aéroports de Paris, va être créée. La ligne sera exploitée par un opérateur spécifique. Aucune subvention publique n'est prévue.

GÉNIE CIVIL SUR LA LIGNE 15 SUD

Les travaux de génie civil d'une partie de la ligne 15 sud du Grand Paris Express ont été attribués par la Société du Grand Paris à un groupement piloté par Bouygues TP, le 1^{er} février, avec Soletanche Bachy France, Soletanche Bachy Tunnels, Bessac et Sade. Montant : 807 millions d'euros HT. Ces travaux interviennent entre les gares de Villejuif-Louis-Aragon et Créteil-l'Échat (Val-de-Marne), dans le sud de Paris. Ils comprennent le génie civil de quatre gares - Créteil-l'Échat, Vert-de-Maisons, Les Ardoines et Vitry Centre - un tunnel de 6,6 km de long et 8,7 m de diamètre intérieur, les puits d'entrée des tunneliers, deux tranchées ouvertes, et d'autres travaux dont un tunnel monovoie de 1,1 km et 6,7 m de diamètre.

LE GRAND PARIS EXPRESS S'INSTALLE EN PHASE TRAVAUX

2017 marque le début de la concrétisation à grande échelle du Grand Paris Express (GPE). Certains travaux ont commencé en 2016, notamment sur la ligne 15 sud : gare de Fort-d'Issy/Vanves/Clamart (Hauts-de-Seine), tunnel entre Noisy-Champs et Bry/Villiers/Champigny (Val-de-Marne), et arrière-gare de Noisy-Champs⁽¹⁾. Cette année, 14 des 16 gares de la ligne 15 sud seront mises en chantier ainsi que 31 de ses 38 ouvrages annexes. Ce sera aussi l'année des travaux préparatoires des lignes 14 sud (prolongation de la 14 vers Orly) et de la 16, au nord-est de Paris, entre Saint-Denis-Pleyel et Noisy-Champs⁽²⁾.

→ **Budget : +58%**

La montée en puissance des travaux s'accompagne d'une augmentation du budget de la Société du Grand Paris (SGP), établissement public de l'État créé en 2010⁽³⁾, chargée de piloter ce métro express autour de la capitale, avec

85% EN SOUTERRAIN

- 200 km de réseau.
- 4 nouvelles lignes à 85% en souterrain.
- 68 gares à construire.
- fin du projet : 2030, sauf tronçon Versailles/Saint-Denis-Pleyel.
- coût : 25 milliards d'euros (2016) hors modernisation réseau existant (3,4 milliards d'euros).

comme objectifs : désengorger Paris, désenclaver des territoires et relier des grands pôles.

La SGP dispose de 1,76 milliard d'euros en 2017 (+58% par rapport à 2016) : 1,25 milliard est consacré aux travaux neufs et 510 millions à l'amélioration du réseau existant. Le 1,25 milliard comprend 1,056 milliard d'investissement et 194 millions de dépenses de fonctionnement. Les ressources - 1,305 milliard - proviennent de différentes taxes aux-

quelles s'ajoutent, pour la première fois, un emprunt, de 700 millions d'euros. La participation de la SGP à la modernisation du réseau - régénération et extension - a commencé avant 2016. Elle consacre 1,5 milliard d'euros au prolongement vers l'ouest du RER E, 800 millions à celui de la ligne 14 vers le nord, 300 à celui de la ligne 11 à l'est vers Rosny-sous-Bois (Seine-Saint-Denis), et 352 à la modernisation d'autres RER.

→ **Observatoire de l'implication des PME**

La participation des PME et des TPE à cette grande opération - au moins 20% des travaux par elles - est mesurée à travers un observatoire et publiée deux fois par an. L'Observatoire des PME complète la plate-forme CCI Business sur laquelle 650 entreprises sont informées des opportunités du GPE, conseillées et mises en relation avec des maîtres d'ouvrage. ■

TRAVAUX ANNEXES : RIPAGE D'UN PONT-RAIL

Des travaux ont lieu à proximité des futures gares du Grand Paris Express. Par exemple, s'est déroulé du 23 au 27 janvier, le ripage d'un pont-rail en béton près de la gare de Champigny-Centre (Val-de-Marne). Il s'agit pour SNCF Réseau de créer un passage piéton sous la ligne 15 sud, qui reliera l'est de la ville à cette gare. Cette opération de 5 millions d'euros est financée par la Société du Grand Paris.

Le pont-rail de 40 m de long, 9 m de haut et 3 500 tonnes, a été glissé en place, à raison de 2 m par heure, sur un radier de guidage puis par des câbles et vérins sur le sol à l'aide d'un coulis spécifique. Il avait été préfabriqué sur place. Le talus a été creusé au fur et à mesure de l'avancement de l'ouvrage (auto fonçage).



Le pont-rail avant sa mise en place dans le talus de la voie ferrée.

TÉLÉPHÉRIQUES À CONSTRUIRE



© GROUPEMENT POMA

À Toulouse, vue depuis la colline Pech David que le téléphérique franchit.

Le téléphérique de Toulouse (Haute-Garonne) sera de technologie Poma, spécialiste du transport de voyageurs par câble qui a remporté ce contrat en groupement avec le cabinet d'architecture Séquences, Altiservice (Engie), Seti (ingénierie infrastructures), Systra et Bouygues TP Régions France.

Les travaux démarrent en 2018 - après concertation et enquête publique - pour une mise en service en 2020. Ce transport par câble est piloté par la Société de la mobilité de l'agglomération toulousaine (Smat), maître d'ouvrage délégué pour le Syndicat mixte des transports en commun de l'agglomération.

Le téléphérique franchit la Garonne et la colline de Pech David, dans le sud de Toulouse. Il forme une boucle de 3 km entre l'Université Paul Sabatier, le Centre hospitalier universitaire Rangueil et l'Onco-pole. Il met dix minutes là où il en faut trente en voiture. Des aménagements le relieront au métro, bus et tramway. Montant conception et réalisation : 54,6 millions d'euros HT.

→ À hauteur maximale

Les élus représentés dans le SMTC ont opté pour la technologie à trois câbles (3S), deux porteurs et un tracteur.

Ce système supporte des vents jusqu'à 108 km/h. Les câbles fixes stabilisent les cabines de 35 places dont les portes s'ouvrent largement, facilitant l'accès des handicapés et des cyclistes. En cas de panne, les cabines sont rapatriées en station. Le téléphérique transportera jusqu'à 1 500 voyageurs par heure et par sens, à 20 km/h.

La ligne est portée par cinq pylônes, éloignés des bâtiments et à la hauteur maxi-

male autorisée, ce qui réduit la vue indiscreète sur les activités survolées (covisibilité) et limite les coupes d'arbres.

→ Amélioration de tous les transports collectifs

Cette opération entre dans la politique de l'agglomération toulousaine de report modal, de cohérence entre urbanisme et

transport, et d'optimisation des réseaux. D'ici à 2019, seront réalisées dix lignes de bus à haut niveau de service.

La ligne A du métro doublera de capacité grâce à des rames de 52 m au lieu de 26, et une 3^e ligne sera créée en 2024, pour relier Colomiers, au nord-ouest, à Labège, au sud-est. ■



© GROUPEMENT POMA

Les cabines sont suffisamment spacieuses pour accueillir les handicapés et les cyclistes.

380 M PRÈS D'ORLÉANS

Fin 2018, une petite ligne de téléphérique franchira les voies ferrées de la gare de Fleury-les-Aubrais, à proximité d'Orléans (Loiret), pour rejoindre le futur quartier Interives. Sur 380 m, elle comprendra une station à chaque bout, deux pylônes et deux cabines (Poma).

La ligne sera construite, à partir de cet automne, par le groupement avec GTM Normandie Centre, mandataire, Sogea Centre, Poma, l'architecte Duthilleul et Systra.

TRAMWAY EN ROCADÉ À LYON

Lyon désengorge son centre-ville par un tramway en rocade. Une partie au sud, la T6, va ouvrir fin 2019. Elle traverse les 7^e, 8^e et 3^e arrondissements, ainsi que Vénissieux et Bron (Rhône), au sud-est de l'agglomération. Elle parcourt 6,7 km avec 14 stations.

Les travaux préparatoires se terminent cet été. Le chantier de l'infrastructure démarre en septembre. Coût : 161 millions d'euros.

SOL À RENFORCER À HONG KONG

Soletanche Bachy renforce le sol d'une 3^e piste de l'aéroport de Hong Kong, en joint venture avec le coréen Sambo E&C.

La filiale de Vinci met en œuvre la technique Geomix, mélange du sol existant avec du ciment.

Le contrat de 380 millions d'euros inclut une plateforme métallique sur pieux de 1 500 m² nécessaire au chantier. En 2019, l'aéroport aura gagné 650 ha sur la mer. Les travaux, débutés fin 2016, ont lieu à partir de barges en mer.

SYSTRA À DUBAÏ ET AU BRÉSIL

Systra participe aux études des 2^e et 3^e phases du tramway de Dubaï (Émirats Arabes Unis), en groupement avec Aecom, ingénierie américaine.

La Roads and Transport Authority lui avait déjà confié la 1^{re} phase - 9,5 km, 11 stations -, ouverte fin 2014. Ce nouveau contrat de quatorze mois porte sur 22,6 km et 28 stations.

Au Brésil, Systra acquiert Vetec, société d'ingénierie spécialisée dans les transports.



© HWELL WATERPANOIS-REA-SYSTRA

Première phase du tramway de Dubaï ouverte en 2014.

CUNETTES EN GÉOSYNTHÉTIQUE

Le Macmat est un géosynthétique destiné aux fossés. Il est formé de trois couches : un géofilm en polyéthylène étanche, un géotextile à la fois drainant et protecteur du géofilm (anti-poinçonnement), et un géomat accroche-terre favorable à la végétalisation. Le produit, en 4 m de large, s'étend manuellement et se recouvre de terre. Un fossé ainsi revêtu collecte les eaux de pluie tout en laissant une partie pénétrer dans le sol. En cas de pollution sur la route, la couche de terre l'absorbe et peut être évacuée et remplacée, selon Maccaferri qui le propose.



Géosynthétique à 3 couches et 4 fonctions.

© MACCAFERRI

MIEUX GÉRER LES DÉCHETS RADIOACTIFS

Dix-neuf projets ont été retenus par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) avec l'Agence nationale de la recherche, début janvier. Objectif de l'appel à projets : favoriser la transposition à la gestion de ces déchets, de technologies et de savoir-faire d'autres domaines. L'Andra en dévoile trois dans un communiqué.

Cyber entend séparer les constituants de bétons radioactifs et les réutiliser en remplissage d'alvéoles de stockage ou dans des mortiers de blocage de déchets en conteneurs, par exemple (Séché Energies, BRGM et Sairem).

Inifuge développe des géopolymères résistants au feu et durables destinés au stockage géologique (Université de Limoges, Institut de chimie de Clermont-Ferrand et Université de Toulouse).

Tomis (CEA et Thales) est un outil mobile de mesure de la radioactivité de matériaux sur chantier de démantèlement.

LA GÉOTHERMIE PEUT TOUT PRODUIRE



Cette centrale géothermique fournira de la chaleur à plusieurs quartiers neufs de Bordeaux (Gironde).

© CT D'ARCHITECTURE MOON SAFARI

La géothermie fournit du chaud, du froid et de l'électricité, en continu, sans dépendre de la météo. En voici quelques exemples où Engie et ses filiales sont impliquées.

Les puits géothermiques de Bègles (Gironde) vont reprendre du service après un arrêt de plus de dix ans. Ils alimentaient depuis 1982 le parc de l'intelligence environnementale Newton (4,5 ha), en banlieue sud de Bordeaux. Une nouvelle centrale approvisionnera en chaleur et en froid le réseau qui irrigue l'ensemble des entreprises du parc. Les travaux démarrent fin 2017.

Pour cette rénovation, l'Établissement public d'aménagement Bordeaux-Atlantique qui mène l'opération d'intérêt national Bordeaux-Euratlantique (sud-est de l'agglomération), a choisi Engie Cofely.

→ Chaud et froid par l'eau de mer

Toujours à Bordeaux mais cette fois dans les futurs quartiers de la Plaine rive droite - Brazza, Niel, Benauges et Garonne-Eiffel - va être implanté un réseau de chaleur, lui aussi basé sur la géothermie, de 25 km de long. Il s'agit d'exploiter une nouvelle couche géothermique, plus profonde et donc plus chaude, recherche confiée par Bordeaux Métropole à Storengy, filiale stockage gaz d'Engie. Cette source sera amenée à couvrir 82% des besoins de chaleur du secteur. Cofely intervient en tant que spécialiste des réseaux de chaleur. Engie a la concession pour trente ans.

Les travaux de forage de ce nouveau doublet géothermique - puits producteur et puits de réinjection - débutent en 2019 pour quatre mois.

La centrale de production de chaleur a été dessinée par le cabinet d'architecture Moon Safari. Coût total de la géothermie : 43 millions d'euros.

Par ailleurs, le quartier Euroméditerranée de Marseille (Bouches-du-Rhône) tire, depuis octobre 2016, son chauffage et sa climatisation de l'eau marine.

L'eau est puisée à 7 m de profondeur en mer, à 14°C en hiver et 22°C en été. Des pompes à chaleur ajustent la température ambiante des bâtiments. Puissance de la centrale : 19 MW. En 2020, le réseau de 3 km desservira 500 000 m². Montant : 35 millions d'euros dont 7 millions d'aides (Feder, Ademe, collectivités locales). L'installation a été réalisée par Cofely, Climespace, Ineo et Axima.

→ Électricité à Sumatra

Enfin, signalons qu'Engie participe à la construction d'une centrale géother-

mique haute température capable de produire de l'électricité, en Indonésie. Storengy est chargée de la reconnaissance du sous-sol et des forages sur le site de Muara Laboh, à 150 km au sud-est de Padang, au centre de l'île de Sumatra.

Il est prévu que la première phase du projet, d'une puissance de 80 MW électriques, soit mise en service en 2019. Les travaux commencent courant 2017.

Engie fait partie du consortium PT Supreme Energy Muara Laboh aux côtés de Sumitomo Corporation (investissement, Japon) et PT Supreme Energy, développeur de projets d'électricité géothermique en Indonésie.

Un accord de financement a été signé en janvier pour 440 millions de dollars (413,48 millions d'euros). ■



Centrale géothermique sur l'eau de mer à Marseille.

© A. MEYSSONNIER

Enka[®]solutions

Géosynthétiques hautes performances pour le génie civil et les travaux publics

Légers, souples et faciles à installer, les produits Enka Solutions accompagnent les projets les plus exigeants partout dans le monde.



Géotextile de renforcement EnkaGrid

Progress through performance
A Low & Bonar solution

Low & Bonar
12 rue de la Renaissance / 92184 Antony Cedex / T +33 157636740
info@enkasolutions.com / www.enkasolutions.com

GALERIE D'ASSAINISSEMENT SOUS LA LOIRE ET UNE VOIE FERRÉE

Mi-avril, va ressortir de terre le micro tunnelier qui aura creusé une galerie pour l'assainissement, sous la Loire à 8 m de profondeur et sous une voie ferrée, à Saint-Cyr-sur-Loire (ouest de Tours, Indre-et-Loire). Il aura réalisé en courbe la liaison entre rive sud du fleuve et rive nord, vers un nouveau poste de refoulement. Ces travaux en un seul tir, au lieu de deux avec un angle, ont valu à la Sade d'être retenue par la communauté d'agglomération, Tour Plus⁽¹⁾. Sogea installe le poste de refoulement. L'ensemble du réseau d'assainissement du secteur a besoin d'être rénové, d'avoir une capacité supérieure et de ne pas fuir. Le refoulement sert à transférer les eaux du collecteur Bord de Loire et du collecteur Nord, en rive nord, vers la station d'épuration située de l'autre côté de la Loire, à 400 m environ, à La Riche.

→ Galerie multi-réseaux

Les eaux usées franchissent la Loire dans des conduites en encorbellement sous

© SADE



Micro tunnelier positionné dans le puits 2, départ du creusement vers le poste de refoulement.

le pont routier de la Motte. En acier de 350 mm de diamètre, elles ont vieilli et sont difficiles à entretenir. Elles sont remplacées par des tubes en PRV (composite) de 800 mm. Ces tubes sont installés dans une galerie sous-fluviale de 2 200 mm de diamètre qu'un micro tunnelier fore jusqu'à avril. Grâce à des joints hydrauliques, le tracé forme une courbe sur la moitié des 620 m. À noter que la galerie de 2 200 mm de diamètre est surdimensionnée par rapport à la conduite d'eaux usées qu'elle abrite, de façon à recevoir d'autres réseaux comme l'eau potable ou

de la fibre optique, à l'avenir. La Sade va également renouveler le réseau gravitaire d'eaux usées, rive nord. Le micro tunnelier creusera des galeries, cette fois de 800 mm de diamètre, vers un déversoir d'orage au bord du fleuve, et un ouvrage de raccordement, au nord. Au total, quatre puits ont été aménagés pour l'activité du micro tunnelier.

→ Refoulement par vases communicants

Sogea construit le nouveau poste de refoulement - diamètre 10 m, profondeur 8 m, débit jusqu'à 2 500 m³/h. Il fonctionne sur le principe des vases communicants, grâce à une cheminée d'équilibre positionnée en rive sud, les pompes faisant l'appoint quand nécessaire. L'ensemble sera mis en service à la mi-2018. Les 6,94 millions d'euros sont financés à parts égales par l'agglomération et l'Agence de l'eau Loire-Bretagne. ■

⁽¹⁾ Maîtrise d'œuvre : Safège.

ASSÉCHER DES PAROIS

Des monuments de Nemours (Seine-et-Marne) qui avaient souffert des inondations en 2016 ont été asséchés par une technique à base d'électro-osmose.

Un boîtier, posé à proximité de la paroi humide, inverse la polarité magnétique entre les murs et le sol, empêchant ainsi la remontée capillaire de l'eau et la renvoyant dans le sol, selon Build 4.0 qui commercialise, en France, ce procédé conçu par deux chercheurs de l'Université des sciences de Zagreb (Croatie).

PARUTIONS IFSTTAR

L'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) publie, avec le Cerema, les résultats des opérations de recherche Auscultation pour des ouvrages sûrs

▷ (Apos) et Maîtrise du cycle de vie (MCV), dans la collection Actes interactifs.

Ces recherches proposent des approches complètes « de l'évaluation non destructive des matériaux et structures pour fiabiliser le diagnostic et donc améliorer la maintenance et la durabilité » et « des structures incluant le risque structural, les mécanismes de dégradation, les méthodes d'inspection, de diagnostic, surveillance et gestion des ouvrages. » L'Ifsttar publie également un guide sur « l'évaluation de l'excavabilité à la pioche des matériaux granulaires traités avec un liant hydraulique, à l'aide d'un essai de poinçonnement », essai « plus pertinent que le critère de résistance à la compression, traditionnellement utilisé. » Collection Techniques et méthodes.

www.ifsttar.fr/collections/

GÉOTEXTILE DOUBLE FONCTION

Tencate Geogynthetics a posé un géotextile à double fonction sous une plate-forme du parc d'affaires Edonia à Saint-Grégoire (Ille-et-Vilaine). C'était, en mars 2016, la première installation en France du Geolon PP60.

Ce tissu de bandelettes combine séparation et renforcement. Il correspond à l'alliance d'une géogrid et d'un géotex-

tile standard. Grâce à sa forte rugosité, il transfère les charges par frottement avec les granulats. Son emploi limite l'épaisseur de remblais jusqu'à 50%, d'après Tencate.

→ Pas de lestage

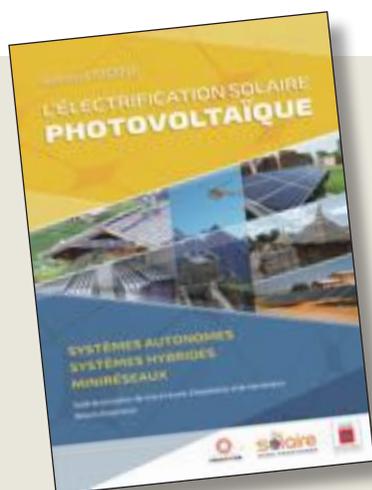
Le produit est constitué de fibres en polypropylène de haute résistance à la traction.

Sa raideur en traction est adaptée au renforcement de sol. Tissu souple disponible en rouleau de 5 m de large, il ne fait pas d'angles dangereux quand il est déroulé et n'a pas besoin de lestage en cours de pose. Il ne se détériore pas pendant son installation ni lors du compactage de la couche de terre, selon son fabricant. ■



Pose sous une plate-forme à Saint-Grégoire (Ille-et-Vilaine).

© TENCATE GEOSYNTHETICS FRANCE



BIBLE DE L'ÉLECTRICITÉ SOLAIRE

Avec 648 pages, l'ouvrage *L'électrification solaire photovoltaïque* traite le sujet sous tous ses angles. Si l'électricité par le solaire est particulièrement adaptée aux sites isolés (absence de réseaux), elle est ici décrite dans toutes les configurations possibles : systèmes autonomes, hybrides

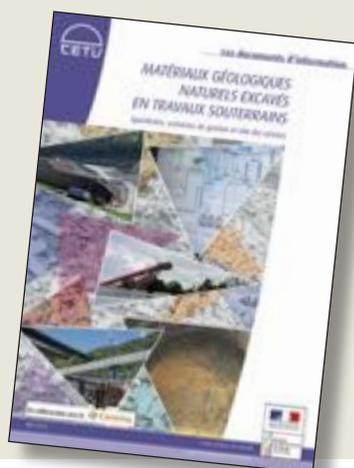
(avec stockage), raccordés au réseau, mini-réseaux, etc.

La présentation des différents composants couvre 150 pages. Études de cas et retours d'expérience occupent 100 pages. La conception des installations autonomes ou hybrides fait l'objet d'une trentaine de pages. La mise en

œuvre, l'exploitation et la maintenance sont précisées sur 65 pages.

L'auteur, Gérard Moine, s'y dédie depuis quarante ans. Il est lui-même producteur de cette énergie depuis plus de vingt ans.

www.energies-renouvelables.org/presse ■



GESTION DES MATÉRIAUX EXCAVÉS

Le Centre d'études des tunnels (Cetu) publie un document d'information sur les matériaux excavés destinés aux maîtres d'ouvrage.

La réutilisation des matériaux issus de travaux souterrains est recommandée par la loi de transition énergétique (17 août 2015) qui promeut l'économie

circulaire. De plus, de grands chantiers vont générer de tels volumes de terres que tout ne pourra pas être réemployé sur place : 35 millions de mètres cubes pour la ligne de train Lyon-Turin et 20 millions pour le Grand Paris Express. La brochure de 32 pages, téléchargeable, propose une démarche de

gestion des matériaux excavés. Elle souligne l'importance du rôle de la maîtrise d'ouvrage à qui il revient de définir une politique de gestion de ces matériaux et de formaliser ses exigences.

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr ■

CESAR LCPC
Code aux Eléments Finis
pour le Génie Civil

Nouvelle version 6
pour toutes vos analyses 2D
ou 3D de tunnels et ouvrages
souterrains...

Téléchargez une version d'évaluation
sur www.cesar-lcpc.com

itech
Editeur de logiciels pour le Génie Civil

8 quai Bir-Hakeim 94410 Saint-Maurice
Tél.: +33 1 49 76 12 59
www.itech-soft.com contact@itech-soft.com

FAITS ET CHIFFRES SUR LA ROUTE

Le transport par la route, voyageurs et marchandises, a baissé légèrement en 2015 par rapport à 2014, selon les chiffres de l'Union routière de France, publiés en octobre⁽¹⁾. En 2015, 87% des déplacements de personnes se sont faits par la route contre 88%, et 86% de ceux de marchandises contre 88%. Les transports collectifs terrestres de personnes ont eux augmenté de

34% à 41%, grâce aux autocars. Selon l'URF, les chiffres du secteur sur la consommation d'énergie finale (28% en 2015), sur les émissions de gaz à effet de serre, sur celles d'oxyde d'azote et de particules fines sont stables sur dix-vingt ans, ou en recul. *Faits et chiffres 2016* (140 pages) détaille l'utilisation du réseau routier en France et en Europe. Il consacre un

chapitre à la qualité de l'air, à l'énergie et à l'effet de serre, un à l'intermodalité, le dernier à l'économie des transports, sans oublier celui sur les véhicules.

www.unionroutiere.fr ■

⁽¹⁾ Quatre collèges d'adhérents : associations d'usagers et Prévention routière ; 9 organismes et 3 industriels de l'automobile ; 4 organisations des services liés à la route ; FNTP, Ser, Usirf, Asta, Cofiroute, Colas, Eurovia.



LE PARFAIT CONDUCTEUR DE TRAVAUX

La 4^e édition du *Mémento du conducteur de travaux* est sortie. Les auteurs, Brice Fèvre et Sébastien Fourage, le destine à la formation initiale ou continue dans le bâtiment et les travaux publics. Il comprend les démarches administratives à tous les stades du chantier depuis la préparation jusqu'au décompte final et

aux garanties. Il propose un index et un glossaire pour une consultation plus rapide. Il inclut un répertoire d'adresses professionnelles et des documents types. www.eyrolles.com ■

VÉRIFIER TOUS LES ENGIN DE CHANTIER

Les engins de chantier doivent être vérifiés même si la réglementation - code du travail, code de la route - n'impose pas de contrôle régulier à tous. C'est pourquoi la FNTP et les représentants des fabricants et distributeurs (Cisma, DLR et Seimat) publient des recommandations à cet effet à l'intention des entreprises. Ce guide aborde, notam-

ment, le cas des matériels de concassage et broyage, ceux de construction, d'entretien de sols et d'exploitation de chaussées. Il comprend une dizaine de pages de méthode suivie de plus de 50 pages rassemblant formulaires et tableaux à remplir pour s'assurer que les engins sont bien en bon état de fonctionnement. www.fntp.fr/publications ■



Membre du Réseau Congés Intempéries BTP

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

Nos missions :

- assurer le service des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
- procéder au remboursement des indemnités de chômage-intempéries versées par les employeurs de la Profession.

La CNETP regroupe **7 300 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **260 000 salariés connus**.

Nos coordonnées :

- **Par courrier :**
31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09
- **Par Internet :** www.cnetp.fr
- **Par mail :** sur www.cnetp.fr, lien [nous contacter](#)
- **Par téléphone :**
 - pour les entreprises : 01.70.38.07.70
 - pour les salariés : 01.70.38.07.77
- **Serveur vocal (24h/24) :** 01.70.38.09.00



AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 6 AU 8 AVRIL

Congrès structures

Lieu : Denver (Colorado, États-Unis)
www.structurescongress.org

• 19 ET 20 AVRIL

Créativité et innovation en conception de structures

Lieu : Bath (Angleterre)
www.iabse.org

• 30 MAI AU 2 JUIN

Thermique des mers et océans, 25^e congrès français de thermique

Lieu : Aix-Marseille Université
www.congres-sft.fr/2017/

• 5 AU 9 JUIN

Conférence européenne sur l'adaptation au changement climatique

Lieu : Glasgow (Écosse)
<http://eccca2017.eu>

• 6 AU 8 JUIN

Le futur du ciment

Lieu : Paris (Unesco)
www.futureofcement2017.com

• 20 JUIN

Forum management énergie et efficacité énergétique

Lieu : Paris
<http://greth.fr>

• 20 AU 22 JUIN

Salon ville sans tranchée

Lieu : Chatou (Yvelines)
www.fstt.org

• 21 AU 23 JUIN

1^{re} conférence internationale sur la valorisation écologique des matériaux granulaires et fibreux

Lieu : Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)
www.cfg.asso.fr/evenements/icbbmecografi-2017

• 26 AU 30 JUIN

Aquaconsoil (recyclage terres, sédiments, contrôle pollution)

Lieu : Lyon
www.aquaconsoil.org

• 12 AU 14 JUILLET

Ecocity World Summit 2017

Lieu : Melbourne (Australie)
<http://vivapolis-ivd.com>

• 6 AU 8 SEPTEMBRE

Passerelles

Lieu : Berlin (Allemagne)
www.footbridge2017.com

• 19 AU 23 SEPTEMBRE

Symposium Engineering the future

Lieu : Vancouver (Canada)
www.iabse.org

• 2 AU 4 OCTOBRE

BFUP, 3^e symposium international

Lieu : Montpellier (Hérault)
www.rilem.org

• 6 AU 10 NOVEMBRE

Batimat

Lieu : Paris (Villepinte)
www.batimat.com

FORMATIONS

• 15 MAI

Ressources énergétiques des gares et stations du réseau ferré urbain

Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 16 ET 18 MAI

Ponts métalliques et mixtes

Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

• 26 ET 27 JUIN

Conduire un projet gare

Lieu : Paris
<http://formation-continue.enpc.fr>

NOMINATIONS

AÉROPORTS DE PARIS :

Gratien Maire est nommé directeur général d'ADP Ingénierie, filiale ▷

d'Aéroports de Paris. Il est chargé des nouveaux aéroports et de la modernisation des existants.

Il remplace Olivier Berger dorénavant responsable du développement de l'ingénierie et de l'innovation du groupe ADP.

ARAFER :

Cécile George devient membre du collège de l'Autorité de régulation des activités ferroviaires et routières.

BIODIVERSITÉ :

Philippe Martin, ancien ministre de l'Écologie, a été désigné par le conseil d'administration de l'Agence française pour la biodiversité, sur proposition de la ministre de l'Environnement, pour en être le futur président exécutif. Hubert Reeves en est le président d'honneur. Deux vice-présidents sont également prévus : Françoise Gaill, coordinatrice de la plate-forme océan et climat, et Ferdy Louisy,

président du parc national de la Guadeloupe.

CANAL SEINE-NORD EUROPE :

Rémi Pavros est pressenti par le secrétariat d'État aux transports pour être le 1^{er} président de la société du canal, créée en novembre 2016. Le député du Nord a remis au moins deux rapports sur ce projet.

CCI FRANCE :

Pierre Goguet a été élu président de CCI France (Chambres de commerce et d'industrie) à la suite d'André Marcon.

CICA :

Jorge Mas (Chili) prend la présidence de la Confederation of international Contractors Associations (entrepreneurs de la construction) à la suite de Emre Aykar (Turquie).

COLAS RAIL :

Francis Grass est nommé PDG. Il succède à Patrick Guérolé, retraité.

ÉCOLE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS LÉONARD DE VINCI :

Frédéric Fauberteau intègre l'école en tant qu'enseignant-chercheur en smart grids, et directeur du département nouvelles énergies.

IABSE :

Fernando Branco (Portugal) a été élu président de l'International Association for Bridge and Structural Engineering en novembre dernier pour trois ans. Il succède à David A. Nethercot (Royaume-Uni).

ÎLE-DE-FRANCE :

Geoffroy Didier succède à Valérie Pecresse à la présidence de l'Établissement public foncier de la région Île-de-France.

MEDLINK PORTS :

Christine Cabau-Woehrel a été désignée présidente de Medlink Ports, association fluvio-portuaire regroupant les ports sur la Saône et le Rhône, ceux de Fos et de Sète

sur la Méditerranée, VNF et CNR. Elle remplace Noël Comte qui devient vice-président.

SMAC :

Franck Davoine est le nouveau président de la filiale étanchéité et enveloppe du bâtiment de Colas, à la suite de Daniel Ducroix, directeur matériel du groupe Colas.

SNCF :

Mathias Vicherat occupe le nouveau poste de directeur général adjoint chargé du projet d'entreprise et de la communication du groupe.

SOCOTEC :

Franck Pettex-Sorgue est nommé directeur général Construction France et Nicolas Detcheperre, directeur général Équipements France. Tous les deux rejoignent le comité de direction.



terrasol

setec

Ingénieurs-Conseils
en géotechnique

www.terrasol.com

INGÉNIERIE
LOGICIELS

» Conception, Maîtrise d'oeuvre, Expertise
Développement, Assistance technique, Formation «

Terrasol est un leader reconnu dans le domaine de l'ingénierie géotechnique, en France comme à l'étranger.

Parmi nos références récentes en France : Grand Paris Express, Eole, Métro de Rennes, Kourou Ariane 6, Tunnel de la Borne Romaine, Ligne Nouvelle Provence Côte d'Azur, Ligne 14 Nord, Terminal méthanier de Dunkerque...

Et à l'étranger : Aéroport des Maldives, Pont du Bouregreg, Centrales électriques de Plomin / Jijel / Biskra, EPR UK, 3^{ème} pont sur le Bosphore, Métro de Riyad, Corniche de Brazzaville, Casa Tour CFC, Cap Lopez...

	<p>Paris</p> <p>Tél : +33 (0)1 82 51 52 00 Fax : +33 (0)1 82 51 52 99 Email : info@terrasol.com</p>	<p>Lyon</p> <p>Tél : +33 (0)4 27 85 49 35 Fax : +33 (0)4 27 85 49 36 Email : lyon@terrasol.com</p>	<p>Maroc</p> <p>Tél : +212 (061) 25 53 89 Fax : +212 (529) 03 64 00 Email : talmalki@terrasol.com</p>
			<p>Tunisie</p> <p>Tél : +216 71 23 63 14 Fax : +216 71 75 32 88 Email : info@terrasol.com.tn</p>

CIGÉO

LA SOLUTION LA PLUS SÛRE SUR LE TRÈS LONG TERME

CIGÉO (CENTRE INDUSTRIEL DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE) EST LE PROJET FRANÇAIS DE CENTRE DE STOCKAGE DE DÉCHETS RADIOACTIFS EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE. ABOUTISSEMENT DE 25 ANS DE RECHERCHES, IL EST CONÇU POUR STOCKER LES DÉCHETS HAUTEMENT RADIOACTIFS ET MOYENNEMENT RADIOACTIFS À DURÉE DE VIE LONGUE PRODUITS PAR L'ENSEMBLE DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES ACTUELLES, JUSQU'À LEUR FIN DE VIE, ET PAR LE TRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USÉS APRÈS UTILISATION DANS LES CENTRALES NUCLÉAIRES ET DANS LES RÉACTEURS DE RECHERCHE. **ENTRETIEN AVEC FRÉDÉRIC LAUNEAU, DIRECTEUR DU PROJET CIGÉO.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



FRÉDÉRIC LAUNEAU, DIRECTEUR DU PROJET CIGÉO, EN PRÉSENTE LES GRANDES LIGNES ET LES OBJECTIFS APRÈS AVOIR RAPPELÉ LES MISSIONS DE L'ANDRA ET LA PROBLÉMATIQUE DE LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS.

Quelle est la mission de l'Andra et comment s'exerce-t-elle ?

L'Andra est un établissement public à caractère industriel et commercial sous la tutelle des ministères en charge de l'énergie, de l'environnement, d'une part, mais aussi de l'enseignement supérieur et de la recherche. Sa mission régalienne est de trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions à la problématique du stockage des

déchets radioactifs. Ces déchets sont produits par l'activité nucléaire dont ils sont une conséquence et ce depuis que le CEA effectue des recherches dans ce domaine, depuis l'existence du parc électro-nucléaire exploité par EDF, en fait depuis l'utilisation dans l'industrie de produits radioactifs.

Ces déchets, considérés comme des substances non valorisables, il faut leur trouver des solutions de stockage



© ANDRA / CIGÉO

appropriées à leur nocivité, à leur dangerosité, pour les mettre définitivement en sécurité par rapport aux populations et à l'environnement. C'est la mission de service public de l'Andra.

Dans cette évaluation de proportion de la réponse à la problématique du stockage de déchets, il existe plusieurs solutions en fonction de la nature des déchets considérés : pour des déchets dits de très faible activité, les solutions ne sont pas identiques à celles que l'on va mettre en œuvre pour des déchets de très haute activité. La dangerosité des déchets radioactifs se détermine par rapport à la durée de vie de la radioactivité des éléments qu'ils contiennent ainsi qu'à leur quantité d'activité par unité de masse.

On distingue ainsi des déchets de faible activité qui sont parfois à vie courte - moins de 31 ans - de déchets de faible activité qui comportent soit des éléments de vie courte, soit des éléments de vie longue - plus de 31 ans - comme le carbone 14 ou le chlore 36.

Quelles sont les solutions de stockage retenues par la France ?

L'Andra définit, met en œuvre et exploite les solutions de stockage de déchets radioactifs adaptées au type de déchets que l'on va considérer.

Pour les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), il est nécessaire de les éloigner suffisamment profondément et dans des couches de protection géologiques stables et imperméables capables de confiner la radioactivité sur de très longues échelles de temps. Pour des éléments de vie plus courte ou d'activité moins grande, il n'est pas forcément nécessaire de les enfouir

FRÉDÉRIC LAUNEAU : PARCOURS

Frédéric Launeau a pris la direction du projet Cigéo en septembre 2015.

Agé de 48 ans, diplômé de l'École Polytechnique puis de Sup'Aéro, ingénieur du corps de l'Armement, Frédéric Launeau a commencé sa carrière à la Direction Générale de l'Armement, au sein des services de maintenance des sous-marins nucléaires puis à la tête d'un programme d'équipement des forces sous-marines.

Il a ensuite travaillé pour Areva auprès de sa filiale SOFINEL, commune avec EDF, en charge de la conception de l'environnement nucléaire des EPR du site de Taishan (Chine) actuellement en construction. Il a aussi coordonné au sein d'Egis Industries des projets de maîtrise d'œuvre d'ensemble et d'études d'exécution de génie civil pour des installations nucléaires, pour le CEA, ainsi que des offres de maîtrise d'œuvre pour le projet Cigéo. Il était précédemment directeur technique du pyrotechnicien Lacroix.

1- Frédéric Launeau, directeur du projet Cigéo.

2- Vue aérienne du site de Meuse/Haute-Marne des futures installations de Cigéo.

3- La zone Puits, située à l'aplomb du stockage.

4- Bloc diagramme 3D des deux installations de surface et de l'installation souterraine à 500 mètres de profondeur.

5- Les équipements liés à la manutention des déchets de haute activité HA.

en couches géologiques extrêmement profondes.

Les solutions sont donc toujours appropriées aux dangerosités. Par exemple, les déchets de faible et moyenne activité et à vie courte (FMA-VC) peuvent être stockés dans des installations construites en surface car leur nocivité ne dure pas au-delà de quelques centaines d'années. Ainsi, l'Andra exploite aujourd'hui trois centres - deux dans l'Aube et un, rempli et actuellement en phase de surveillance, dans la Manche - où sont stockés en surface des déchets de faible activité et de très faible activité.

Pour des déchets de classe intermédiaire, entre déchets de haute activité ou moyenne activité à vie longue et déchets de faible et moyenne activité, c'est-à-dire des déchets de faible activité mais qui peuvent être à vie longue, l'Andra développe également des solutions de stockage appropriées. Il s'agit, soit de solutions d'enfouissement en

surface ou en sub-surface - entre 0 et 30 mètres -, soit de solutions de traitement au sein des sites de production de déchets.

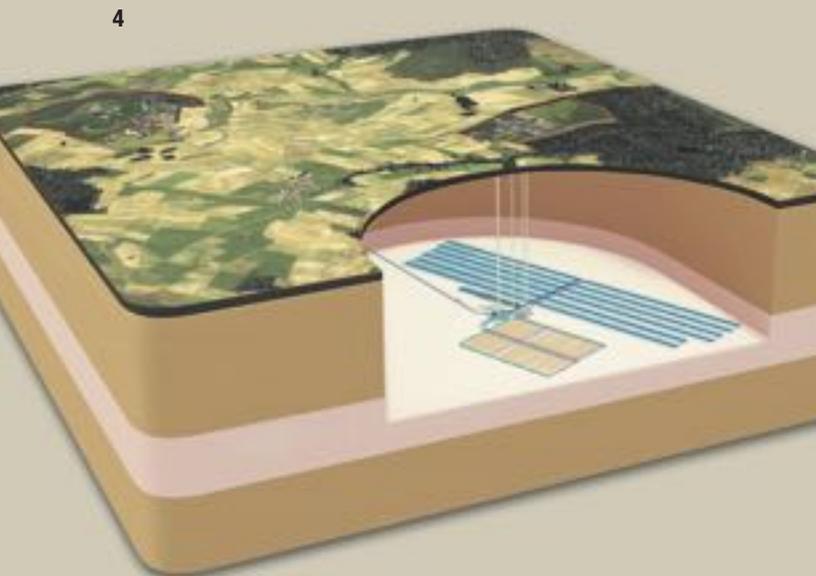
Dans cette perspective, quel est le rôle de Cigéo au sein de l'Andra ?

Cigéo est le projet de stockage géologique profond, à la limite de la Meuse et la Haute-Marne, retenu par le Parlement pour les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Ce sont les déchets produits par l'exploitation des combustibles qui alimentent les centrales nucléaires. Après leur utilisation dans les réacteurs des centrales EDF, les combustibles usés sont retraités à l'usine Areva de La Hague. Cette opération vise à séparer les matières valorisables telles que l'uranium et le plutonium des éléments non réutilisables, les déchets radioactifs, comme les produits de fission et actinides mineurs qui sont conditionnés sous forme de colis cylindriques standardisés en inox contenant ces déchets dans une matrice vitrifiée. Les déchets de moyenne activité à vie longue sont aussi issus du retraitement du combustible, ce sont les déchets issus des éléments de conditionnement des combustibles ; ces déchets sont le plus souvent intégrés dans des colis standardisés en inox ou en béton sous forme de déchets solidifiés dans une matrice, vitrifiée ou bitumineuse, ou alors compactés.

L'objectif fondamental de Cigéo est de protéger l'homme et l'environnement du danger que représentent ces déchets. Pour cela, il faut les éloigner suffisamment durablement et précautionneusement en les confinant dans un milieu géologique stable depuis 160 millions d'années pour que, ▷

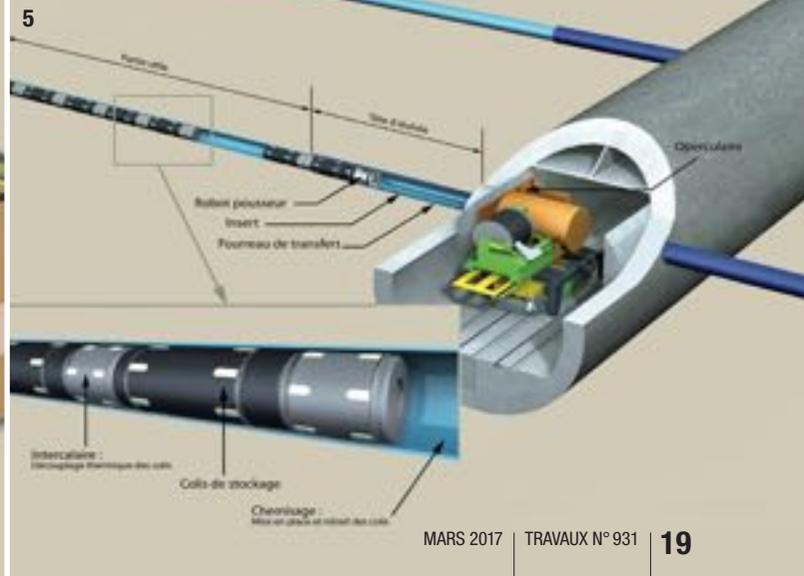
© ANDRA / CIGÉO

4



© ANDRA / CIGÉO

5



CATÉGORIE	Déchets dits à vie très courte contenant des radionucléides de période < 100 jours	Déchets dits à vie courte dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période < 31 ans	Déchets dits à vie longue dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période > 31 ans
Très faible activité (TFA)	VTC	TFA Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	
Faible activité (FA)	Gestion par décroissance radioactive	MA-VL Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	FA-VL Stockage à faible profondeur à l'étude dans le cadre de l'article 4 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
Moyenne activité (MA)			MA-VL Stockage profond à l'étude dans le cadre de l'article 3 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
Haute activité (HA)	Non applicable	HA	

6

© ANDRA / CIGÉO

pendant cette période de décroissance radioactive, il n'y ait aucun risque de dissémination.

Les éventuelles migrations de radionucléides à travers le milieu géologique se feront de manière suffisamment lente et maîtrisée de telle sorte que, lorsqu'ils atteindront la limite de la couche géologique d'accueil, le callovo-oxfordien, situé à 500 mètres de profondeur, leur activité radiologique aura suffisamment décliné pour ne plus représenter de danger.

Quelle est la typologie des productions de déchets radioactifs ?

Cette typologie est assez variée. Plus de 1 000 producteurs génèrent annuellement l'équivalent de près de 2 kilos de déchets radioactifs par an et par habitant.

Les grands producteurs de déchets de moyenne activité et de haute activité à vie longue sont assez aisément identifiables. Ce sont les grands exploitants nucléaires : le CEA en ce qui concerne les réacteurs de recherche, EDF pour les déchets provenant du parc électronucléaire ancien ou de type EPR, bientôt mis en exploitation.

Areva est également un producteur de déchets nucléaires au travers de ses activités d'enrichissement de l'uranium ou du processus final de retraitement utilisé à La Hague.

D'autres producteurs sont moins visibles : Solvay, par exemple, dont certaines installations produisent des déchets radifères. La médecine est également un producteur de déchets, essentiellement de faible et moyenne activité, dont le stockage ne pose donc pas de problème particulier, mais qu'il

6- Classification des déchets radioactifs.

7- Zone MA -VL de stockage de colis de déchets de moyenne activité à vie longue MA - VL.

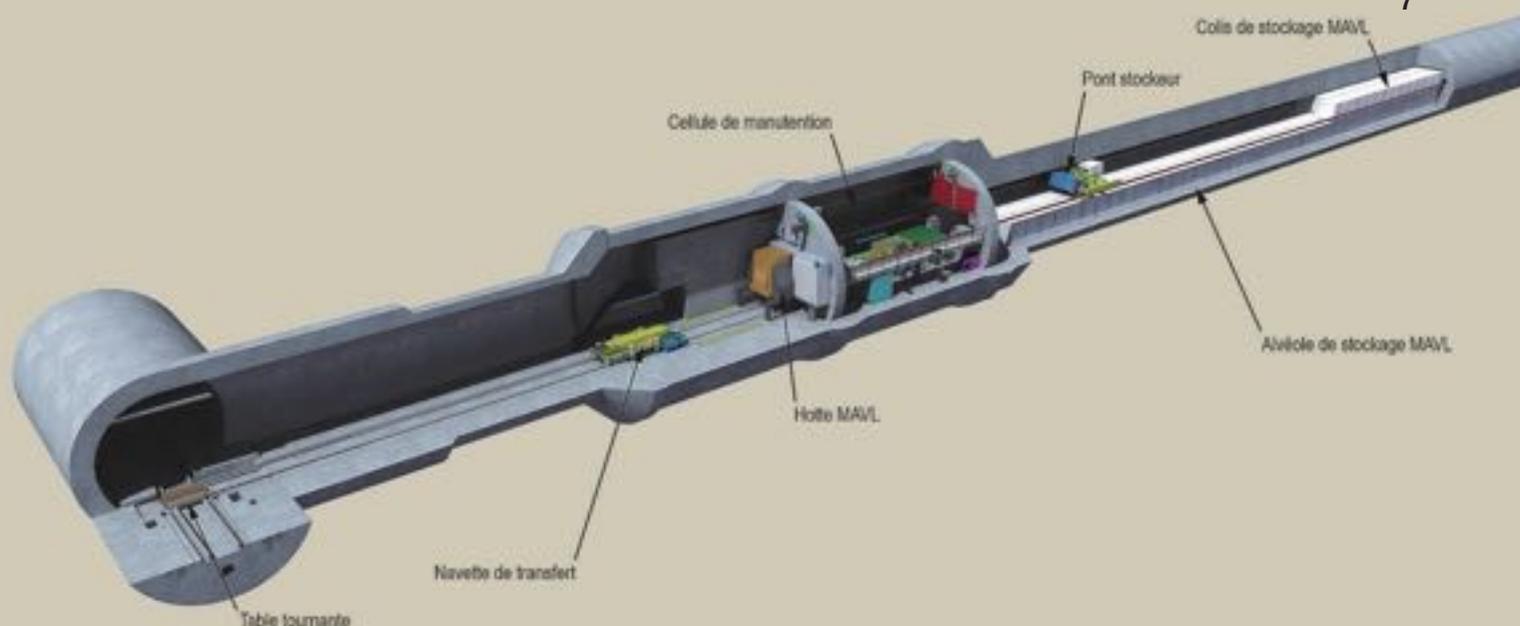
est quelquefois difficile de recenser en raison de la variété de leurs origines. L'Andra recueille également l'ensemble des déchets produits par l'activité médicale et l'activité de recherche. Elle est également en charge du recensement et du recueil des déchets que l'on peut qualifier « d'historiques » depuis la découverte à la fin du 19^e siècle de la radioactivité naturelle et l'existence de la radioactivité artificielle.

Au début du 20^e siècle, de nombreuses entreprises ont effectué des opérations de type nucléaire avec production de déchets radioactifs que l'on retrouve lors des travaux d'assainissement de sites, qui étaient autrefois des sites industriels mettant en œuvre des processus de transformation utilisant de près ou de loin la radioactivité, par exemple les premiers dispositifs médicaux de radiothérapie.

Lorsqu'on a entrepris d'assainir ces sites pour les rendre à la vie courante, il n'a pas été rare de retrouver des substances radioactives provenant de leur activité industrielle antérieure, qui ont été considérés comme des déchets radioactifs et pour lesquels il a fallu trouver des solutions d'assainissement qui, au final, passaient par des solutions de stockage de déchets radioactifs qui ne sont pas de haute activité.

© ANDRA / CIGÉO

7



Comment le recensement des déchets radioactifs est-il réalisé ?

Tous les producteurs, pour toutes les productions, sont soumis à activité déclarative auprès de l'Andra qui établit tous les 3 ans, au titre de sa mission de service public, un inventaire de l'ensemble des matières et déchets radioactifs.

Au-delà de l'inventaire, est également défini l'ensemble des solutions d'entreposage et de stockage pour ces différents types de déchets pour lesquels, au final, l'Andra met en œuvre les solutions adaptées au stockage de très longue durée de ces déchets.

C'est donc à ce niveau qu'intervient le projet Cigéo ?

Cigéo est le projet, mené par l'Andra, conformément à la loi, visant à la mise en sécurité définitive des déchets de moyenne activité à vie longue et de haute activité produits essentiellement par l'industrie électro-nucléaire.

L'activité industrielle consistera pour Cigéo à être en mesure de stocker environ 10 000 m³ de déchets haute activité qui sont le résultat de l'exploitation de 50 années du parc électro-nucléaire français. Il faudra également stocker environ 75 000 m³ de déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue qui sont également la conséquence de l'exploitation du parc électro-nucléaire et des processus de retraitement.

Ces 85 000 m³ de déchets MA-VL et de déchets HA représentent 99 % de la radioactivité que l'on trouve dans les différents déchets mais seulement 3 % en volume des déchets que l'Andra est amenée à gérer dans l'ensemble de ses solutions de stockage.

CIGÉO EN QUELQUES CHIFFRES

230 kilomètres de galeries et d'alvéoles, dont 30 km réalisés pour la phase industrielle pilote.

114 km de descenderies, de galeries et d'alvéoles pour les déchets MA-VL.

151 km d'alvéoles pour les déchets HA.

Les descenderies et les galeries d'accès s'apparenteront à des tunnels souterrains classiques d'un diamètre de 8 à 9 m, adaptés à une construction à 500 m de profondeur.

Les alvéoles sont de deux types :

- **Les alvéoles destinées au stockage des déchets MA-VL auront un diamètre de 8 à 9 m de diamètre.**
- **Les alvéoles pour le stockage des déchets HA conditionnés auront un diamètre de l'ordre de 0,70 m et une longueur de 100 à 150 m de long.**

8- Hotte de transfert des colis de déchets radioactifs descendant vers la zone de stockage via le funiculaire.

9- Exemple de conteneur prototype et colis primaire de déchets HA pour essais de qualification.

10- Exemple de colis de déchets MA-VL.

Cigéo ne va donc traiter qu'un très faible volume de l'ensemble des déchets radioactifs.

Les déchets de très faible, faible et moyenne activité à vie courte représentent plus de 90 % du volume des déchets radioactifs.

Les déchets à vie longue HA- et MA-VL concentrent la quasi-totalité de la radioactivité et leur vie longue empêche de les stocker en surface ou à faible profondeur.

Cigéo apportera ainsi une solution au stockage des déchets les plus radioactifs.

Il est l'aboutissement d'un processus de 25 ans de recherche depuis la création de l'Andra en 1991.

Le principe du stockage profond a été retenu par la loi de 2006, après 15 ans de recherche, leur évaluation et un débat public, comme seule solution sûre à long terme pour gérer ce type de déchets sans en reporter la charge sur les générations futures.

À partir de 2011, il a été lancé une étape de conception préliminaire de ce qui serait un centre industriel de stockage qui pourrait être mis en service à l'horizon 2030 pour traiter l'ensemble de l'inventaire des déchets MA-VL et HA. Compte tenu des volumes à prendre en considération - 10 000 m³ de HA

et 75 000 m³ de MA-VL - la mise en enfouissement va s'étaler sur près de 130 ans.

La problématique d'aujourd'hui, en 2017, est de concevoir un centre industriel qui va être mis en service à l'horizon 2030 pour environ 130 années d'exploitation, avant fermeture définitive et démantèlement des installations de surface.

Quelles sont les grandes lignes de ce projet et à quel stade d'avancement est-il ?

C'est un projet en phase de conception préliminaire. Après la phase d'avant-projet sommaire de 2013 à 2015, nous sommes actuellement en phase d'avant-projet plus détaillé de façon à déposer une demande d'autorisation de création en 2018.

Après un processus d'instruction par l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN) appuyé par l'IRSN⁽¹⁾, nous visons une autorisation de création par décret à l'horizon 2021 pour lancer les travaux de construction en projetant une mise en service à l'horizon 2030.

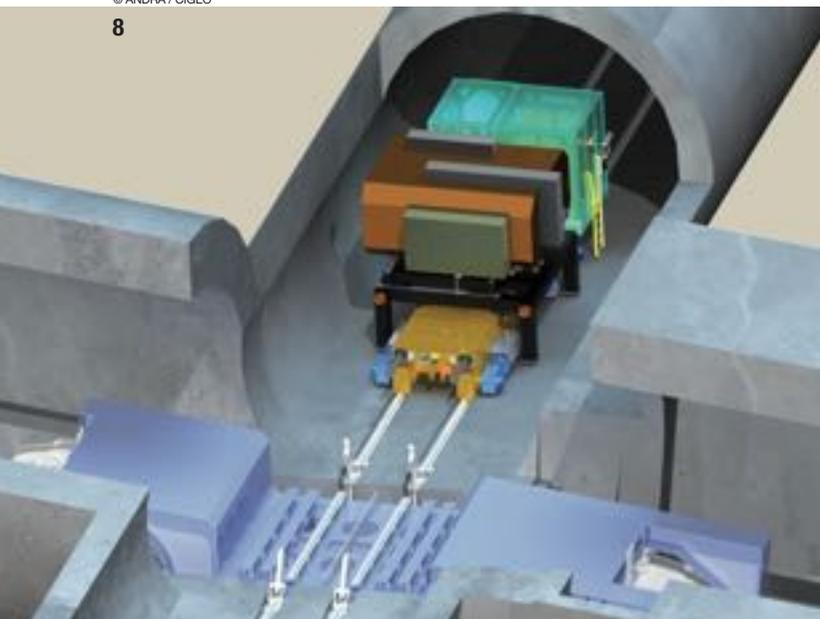
Il s'agit d'une architecture souterraine de plus de 230 km de galeries composée d'alvéoles de stockage dans une couche d'argile épaisse de 145 mètres, âgée de 160 millions d'années, retenue pour ses bonnes propriétés de confinement, notamment sa stabilité et sa très faible perméabilité.

Cette architecture souterraine qui se déploie horizontalement à 500 m de profondeur est reliée à la surface à deux sites.

Un premier site, à la verticale de cette architecture souterraine, y est relié par l'intermédiaire de 5 puits de 6 à 8 mètres de diamètre qui vont permettre l'exploitation du stockage au sein de l'architecture souterraine. ▷

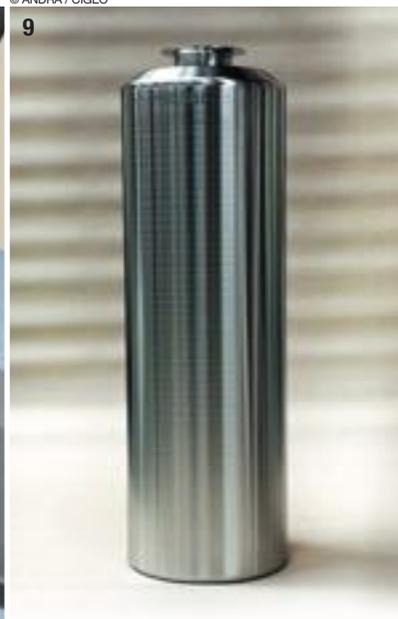
© ANDRA / CIGÉO

8



© ANDRA / CIGÉO

9



© ANDRA / CIGÉO

10



Les colis de déchets radioactifs en provenance de toute la France, du site de La Hague ainsi que des autres sites d'entreposage en France - d'EDF et du CEA, notamment - arriveront essentiellement par convois ferroviaires dans une installation de surface à partir de laquelle ils seront expédiés vers l'installation souterraine par l'intermédiaire d'un funiculaire empruntant une descenterie de plus de 4 km de long à une pente à 12%.

Une loi promulguée en juillet 2016 caractérise une exigence fondamentale de ce centre : celle de sa réversibilité⁽²⁾. Cette loi précise également que l'exploitation de ce site, c'est-à-dire le stockage des colis de déchets radioactifs doit débuter par l'intermédiaire d'une phase industrielle pilote qui est la préfiguration de ce qui sera l'exploitation régulière du site pendant les 100 années nécessaires pour stocker la totalité de l'inventaire des déchets radioactifs.

Nous allons donc prévoir une fenêtre temporelle d'une dizaine d'années pour cette phase industrielle pilote, pendant laquelle nous allons faire les essais de l'installation, dans un premier temps en inactif, sans les colis de déchets puis, dans un deuxième temps, avec les différents types de colis que nous aurons à gérer pendant les 100 années à venir.

À l'issue d'un premier bilan d'exploitation de cette phase industrielle pilote d'une dizaine d'années qui permettra, dans le cadre d'une mise en service partielle, une montée progressive en puissance de l'installation, nous retournerons devant l'ASN et devant le Parlement et c'est une nouvelle loi qui nous autorisera à nous mettre dans une configuration d'exploitation de manière définitive.



11

Ainsi, la mise en service s'opérera-t-elle en deux temps ?

Cigéo va être exploité pendant suffisamment longtemps pour que nous puissions déployer ses installations de manière progressive.

La phase industrielle pilote va se dérouler dans une petite partie de l'infrastructure définitive.

11- Stockage de colis dans le centre de l'Aube.

12- Vue aérienne du centre de stockage de l'Andra dans l'Aube.

13- Vue aérienne du centre de stockage de l'Andra dans la Manche.

En revanche, au fur et à mesure de la progression de l'exploitation, nous allons poursuivre en parallèle, par tranches successives, la construction de l'installation pour être en mesure de stocker, dans un premier temps, les déchets de moyenne activité à vie longue que nous allons recevoir entre 2030 et 2080 et, à partir de l'horizon 2080, les déchets de haute activité jusqu'à l'horizon 2140.

Cigéo va être construit progressivement et va constituer une succession d'extension d'installations nucléaires capables de stocker, également de manière progressive, les différents flux de colis de déchets radioactifs.

Dès la phase industrielle pilote seront construits les grands invariants de Cigéo, c'est-à-dire les installations de surface et notamment la zone de soutien à l'exploitation souterraine, les puits et les descenteries ainsi qu'une petite partie de l'architecture souterraine de stockage préfigurative au stockage des déchets de haute activité et quelques alvéoles de stockage pour les déchets de haute activité à vie longue.

Le chantier de travaux souterrains commencera dès obtention du décret d'autorisation, visée à l'horizon 2021, par le creusement des descenteries et des puits et se terminera une centaine d'années plus tard par la terminaison de l'architecture souterraine capable de stocker l'ensemble de l'inventaire qui est aujourd'hui retenu. □

1- IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

2- La loi du 25 juillet 2016 définit la réversibilité comme « la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion ».

© ANDRA / CIGÉO

12



© ANDRA / CIGÉO

13



Assurer ses risques professionnels, c'est bien.
Être conseillé et accompagné, c'est mieux !

Avec SMABTP, à chaque métier son contrat sur mesure et son conseiller spécialisé.

Votre conseiller expert vous recommande **Atout TP** qui couvre tous les risques des **entreprises de TP** en un seul contrat : pour la protection de toutes vos activités et de vos engins en circulation ou au travail. L'offre s'adapte et se module à chaque type de chantier et en fonction du profil de votre entreprise. Vous obtenez aussi un soutien et des aides dans vos démarches de prévention des accidents.

Et parce que chaque profession est unique, nous déclinons nos solutions d'assurance par métier depuis près de 160 ans.

Notre métier : assurer le vôtre



Découvrez toutes nos solutions d'assurance de personnes (dirigeants et salariés), de biens professionnels et d'activités.

www.groupe-sma.fr




SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

SMABTP: société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics, société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances RCS PARIS 775 684 764 - 114 avenue Emile Zola - 75719 PARIS Cedex 15



↑ © HDI/ENTREPOSE GROUP

HDI LE FORAGE DIRIGÉ SOUS HAUTE EXPERTISE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

HDI (HORIZONTAL DRILLING INTERNATIONAL) A ÉTÉ CRÉÉE EN OCTOBRE 1984 AU SEIN DE SPIE BATIGNOLLES AFIN DE RÉALISER DES FORAGES HORIZONTAUX DIRIGÉS POUR DES FRANCHISSEMENTS D'OBSTACLES. L'ENTREPRISE A GAGNÉ SON EXPÉRIENCE SUR PLUS DE 2 000 TRAVERSÉES RÉALISÉES DANS 40 PAYS DIFFÉRENTS, SOIT PLUS DE 2 000 KM DE CANALISATIONS INSTALLÉES, DANS LES CONDITIONS GÉOLOGIQUES LES PLUS VARIÉES, CE QUI LUI PERMET DE RÉSOUDRE PARTOUT DANS LE MONDE LES PROBLÈMES LES MOINS CONVENTIONNELS. DENIS PELLERIN, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE HDI, PRÉSENT DANS L'ENTREPRISE DEPUIS 1985, QUASIMENT DEPUIS SA CRÉATION, NOUS PRÉSENTE SA LONGUE EXPÉRIENCE AU TRAVERS DE QUELQUES-UNS DES CHANTIERS DE RÉFÉRENCE QUI ONT JALONNÉ SON PARCOURS ET QUI FONT L'HISTOIRE DE HDI.

Il s'agissait à l'époque d'une technique innovante, quasiment inconnue, qui lui a permis de se développer rapidement au sein de Spie Capag alors filiale du groupe Spie batignolles. Après avoir connu divers actionnaires de référence, HDI a retrouvé en 2010

Spiecapag, spécialisée dans la pose de pipelines, désormais filiale du groupe Entrepose. La boucle était bouclée. À la suite d'une réorganisation récente des lignes de métiers du groupe Entrepose, HDI a été intégrée en 2016 au pôle forage nouvellement créée

1- Foreuse 400T dans l'enceinte de l'aéroport Roissy - Charles De Gaulle à Paris.

qui regroupe trois entreprises : HDI, Entrepose Drilling (forage vertical pour la géothermie, le pétrole et le gaz) et la société brésilienne Intech (forage horizontal dirigé), acquise en 2016 et qui était le partenaire de HDI au Brésil depuis plus de 20 ans.

« Nous faisons un grand pari sur le Brésil, précise Denis Pellerin. Ce pays qui est un continent à lui tout seul dispose de ressources importantes mais a aussi des besoins importants en infrastructures, auxquels nous sommes en mesure d'apporter des réponses ». HDI emploie aujourd'hui 70 personnes et réalise un chiffre d'affaires de 40 millions d'euros, dont 70 % à l'export, essentiellement sur les grands projets de pipelines.

L'entreprise dispose d'une cellule "France" dont le domaine de prédilection est les forages périurbains avec des foreuses compactes, en petit diamètre et sur des longueurs d'au maximum 400 m. Cette activité représente 10 % du chiffre d'affaires.

« Lors des interventions à l'étranger, précise Denis Pellerin, ce sont pratiquement des équipes "commando" que l'entreprise délègue sur place avec les matériels appropriés, dont la durée des interventions varie de trois semaines à six mois par ouvrage ».

2- Les trois étapes du procédé de forage dirigé.

3- Le procédé de forage dirigé appliqué aux atterrages.

DES MACHINES DE 50 À 400 TONNES DE FORCE DE TRACTION

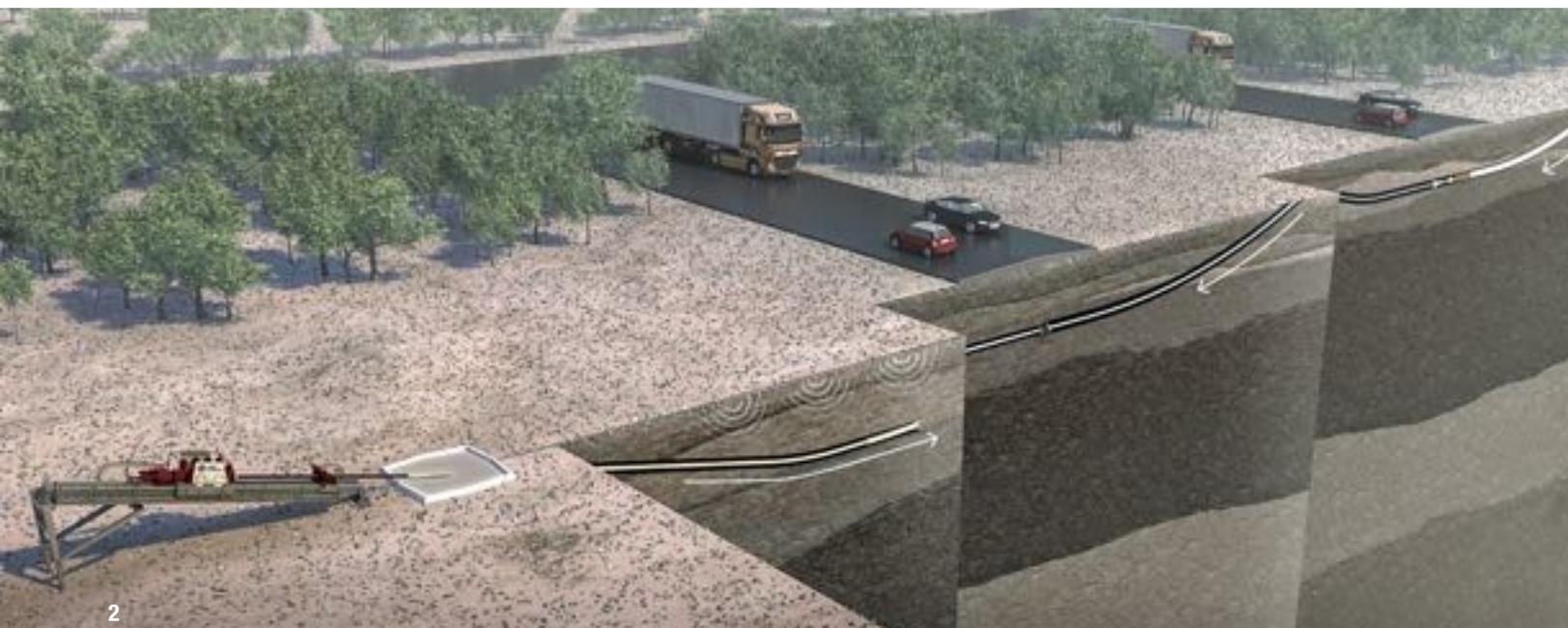
Les équipes de HDI disposent d'une gamme de matériels très complète, de 50 à 400 t de force de traction, ce qui leur permet de franchir tous types de matériaux.

Le parc comprend 16 foreuses - 10 en France, 6 au Brésil - qui sont associées à plusieurs matériels d'accompagnement : unités de malaxage et de recyclage du fluide de forage (trémies, cyclones, centrifugeuses), pompes haute pression, compresseurs, etc. Le fluide de forage est à base de bentonite, comme pour les parois moulées, avec des additifs non polluants, de manière à préserver l'environnement,

ce qui est essentiel puisque les forages sont exécutés à faible profondeur. La circulation se fait en boucle.

« Les premières foreuses ont été conçues et fabriquées par HDI, poursuit-il. Par la suite, plusieurs industriels s'y sont intéressés. Nous avons choisi de travailler avec deux d'entre eux : Herrenknecht, en Allemagne, pour les grosses foreuses, et American Augers, aux États-Unis, pour les petites. Le matériel périphérique est fabriqué par des spécialistes du pompage et du recyclage ».

« Nous utilisons également deux foreuses de conception et de fabrication HDI. La question s'est posée à l'époque de savoir si nous étions une entreprise de travaux ou un fabricant ▷



de machines. Nous avons fait le choix de rester une entreprise de travaux et de ne pas commercialiser nos matériels à l'extérieur, ce qui explique que nous faisons désormais appel, sauf exception, à des constructeurs spécialisés, tout en conservant un atelier de mécanique propre à Dunkerque, ne serait-ce que pour assurer l'entretien et la maintenance de notre parc ». Pour les travaux dans les terrains instables ou de mauvaise cohésion, l'entreprise dispose d'un micro-tunnelier Herrenknecht AVN1200 utilisé spécifiquement pour les entrées et sorties de forage dans les zones de surface jusqu'au socle rocheux. Ce matériel a été mis en œuvre sur un chantier dans le port du Havre.

HDI fait partie des leaders mondiaux sur le marché très concurrentiel du forage dirigé avec des traversées de 2 000 m de longueur et de diamètre jusqu'à 48". Les méthodes qu'elle utilise sont le forage horizontal dirigé, le micro-tunnelier et le Direct Pipe. Ces méthodes peuvent être combinées afin de proposer, pour tout problème de franchissement, des solutions efficaces et respectueuses de l'environnement, en toute sécurité pour le personnel d'exécution et les riverains.

L'activité "micro-tunnelier" exercée principalement en France lui permet de réaliser des ouvrages de 1 200 à 1 600 mm de diamètre.

La technologie du Direct Pipe ouvre de nouvelles possibilités pour l'installation des pipelines dans tous les types de géologie. Cette méthode combine les avantages du forage horizontal et de la technologie du micro-tunnelier. En une seule étape, un pipeline préfabriqué peut être installé pendant que le forage nécessaire à sa mise en place est excavé dans le même temps. Cela permet une installation rapide de pipelines jusqu'à 1 000 m de long.

PORT DU HAVRE : REPOUSSER LES LIMITES

Le projet dans et sous le port du Havre, réalisé en 2009, reste à ce jour un ouvrage remarquable.

Sur ce chantier, HDI a mis en œuvre simultanément plusieurs techniques innovantes afin de réaliser pour Total une traversée par forage horizontal dirigé de 1 500 m pour une canalisation pétrolière en acier de diamètre nominal 850 mm.

Un projet hors du commun à bien des égards par sa difficulté et son ampleur et original pour la combinaison des techniques.



© HDI (ENTREPOSE GROUP) 4

LE GROUPE ENTREPOSE EN BREF

Filiale de Vinci, acteur mondial des concessions et de la construction, le groupe Entrepose est un entrepreneur international qui conçoit, réalise et opère des infrastructures de production, de transport et de stockage pour l'industrie pétrolière et gazière, ainsi que pour les autres sources d'énergie.

Entrepose intervient partout dans le monde pour la réalisation de projets clés en main au travers de contrats d'EPCC (engineering, procurement, construction, commissioning) ou de marchés de travaux de spécialités. Il se distingue par son expertise et de très nombreuses références en management des projets de grande envergure.

Le savoir-faire d'Entrepose est porté par des marques internationalement reconnues qui développent des solutions globales couvrant la totalité des projets d'infrastructures et d'équipements du secteur pétrolier et gazier dans les domaines terrestre, maritime et souterrain - y compris leurs interfaces.

Sur le port du Havre, Total possède une de ses plus grandes raffineries ; elle est alimentée par une canalisation de 34"(DN 850 mm) de diamètre qui chemine dans le port depuis la CIM (Compagnie Industrielle Maritime). En raison de problèmes récurrents de

4- Denis Pellerin, directeur général de HDI.

5- Démarrage du forage d'une gaine d'entrée inclinée sur le site du Havre.

maintenance au niveau d'une écluse, Total a souhaité dévier sa canalisation selon un trajet plus direct, franchissant en souterrain les voies maritimes séparant la CIM de la raffinerie ; mais l'encombrement du site portuaire, ainsi que la géologie défavorable du site, nécessitaient qu'une étude approfondie soit menée. Pour évaluer la faisabilité d'un franchissement de 1 500 m sous la Darse de l'Océan et le Grand Canal, HDI a proposé à Total de travailler en partenariat en réalisant un forage parallèle d'exploration, qui a permis non seulement de récupérer des échantillons représentatifs des terrains à forer, mais aussi de prendre de l'avance sur la réalisation des travaux.

Après un mois d'ingénierie et deux mois de forage, HDI a ensuite développé une solution technique combinant les techniques du forage horizontal dirigé et du micro-tunnelier.

« La réalisation d'un tel ouvrage présentait plusieurs gageures techniques, indique Denis Pellerin, que les équipes d'HDI ont su relever avec ingéniosité et savoir-faire ».

« La première difficulté se situait au niveau du franchissement lui-même. En effet, les profondeurs de passage sous les voies maritimes imposées par les autorités du port obligent la traversée d'une couche de galets de silex très impropres à la technique du forage horizontal dirigé ».

HDI s'est affranchi de cette contrainte en installant de part et d'autre de la traversée une gaine d'acier de 1 620 mm de diamètre depuis la surface jusqu'aux



© HDI (ENTREPOSE GROUP) 5



marnes calcaires situées sous les silex, à 35 m de profondeur.

Après presque 6 mois de forage, les marnes ont été atteintes et les deux gaines inclinées de 200 m chacune mises en place de part et d'autre de la traversée par un micro tunnelier Herrenknecht AVN 1200, spécialement modifié à cette occasion pour être rétracté à l'intérieur des gaines.

Les équipes de forage horizontal dirigé ont pu ensuite continuer le travail en

6- Alignement d'un forage dirigé traversant le port du Havre en France.

7- Caténaire aérienne pour une canalisation DN 850 pour le chantier de la raffinerie Total au Havre.

8- Tirage d'une canalisation dans son trou de forage.

forant un trou pilote avec deux foreuses de 100 et 400 t, travaillant en vis-à-vis depuis chaque extrémité au travers de chacune des gaines, en prenant soin d'y centrer le train de tiges ; chaque trou pilote a été guidé l'un vers l'autre grâce à un système de guidage très perfectionné, appelé "intersect", et leur jonction s'est faite en position centrale sous la Darse de l'Océan à une profondeur de 70 m sous la surface après un mois de forage.

Le trou pilote de 200 mm de diamètre a ensuite été alésé en trois passes successives avec des outils à molettes de diamètre 700 mm, puis 1 000 mm, pour atteindre le diamètre final de 1 200 mm nécessaire au tirage de la canalisation.

Une autre difficulté de ce projet était liée à l'encombrement du site et au maintien permanent du trafic de containers, tant par la route que par le fer.

En effet, la technique du forage horizontal dirigé nécessite que la canalisation destinée au franchissement soit préparée en surface, si possible en un seul tronçon et dans l'alignement du forage. Or, le site n'offrait qu'une seule zone possible pour la préparation de la canalisation, située le long de la route menant à la CIM, mais fortement désaxée par rapport au trou de forage.

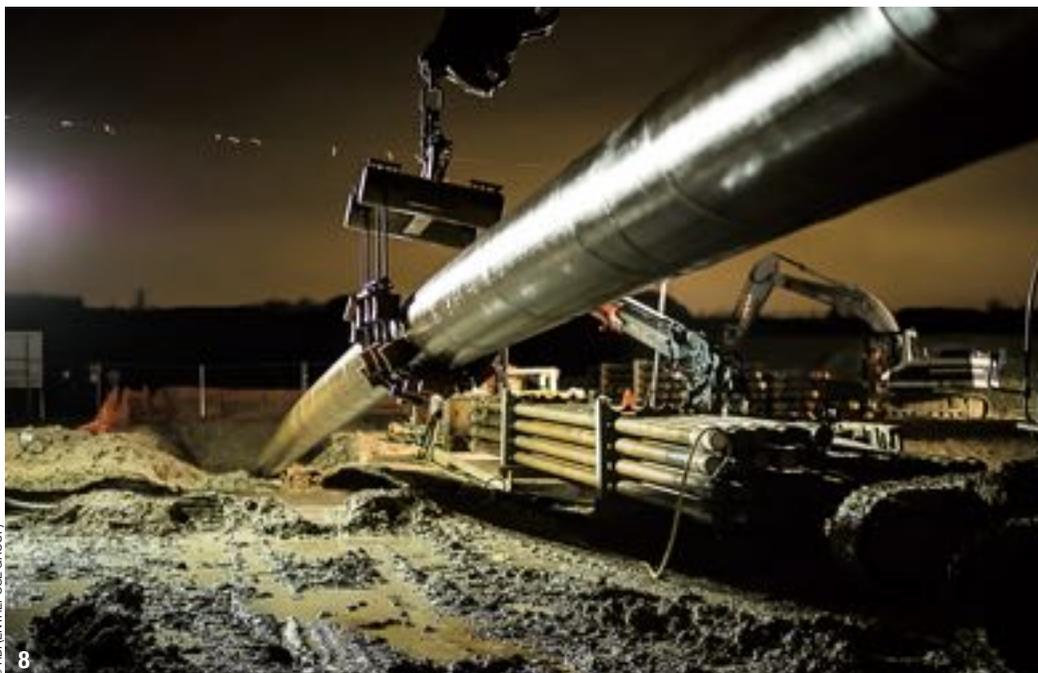
S'AFFRANCHIR D'UN ENVIRONNEMENT CONTRAIGNANT

« HDI a donc conçu un dispositif appelé "caténaire" pour permettre d'amener la canalisation dans l'axe du forage depuis cette aire de travail, en passant avec 7,20 m de tirant d'air au-dessus des routes et des voies ferrées et sans que la canalisation ne subisse d'efforts inappropriés ».

« C'est ainsi que, simultanément à la construction de la canalisation et aux travaux souterrains, une cinquantaine d'appuis suspendus équipés de rouleaux disposés selon un rayon de courbure de 600 mètres ont été implantés : 43 pieux ont été battus de 15 à 20 m dans le sol, tandis que 14 ont été scellés dans des containers remplis de béton armé dans les zones sous lesquelles courent des pipelines en service ».

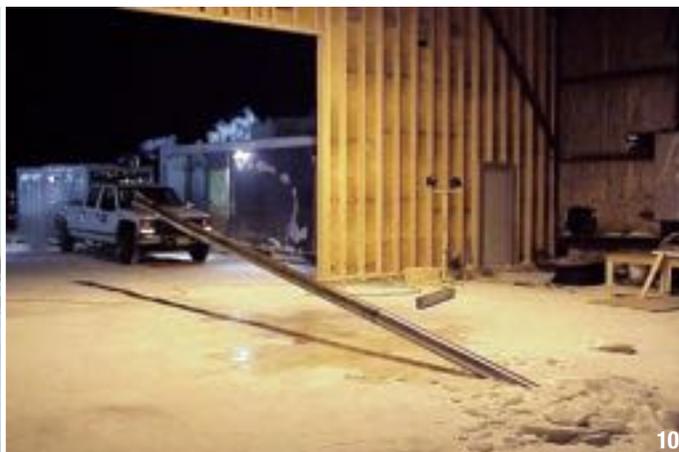
Après un mois d'alsages jour et nuit, pendant lesquels le forage d'exploration parallèle a été mis à profit pour transférer les boues de forage d'un site à l'autre, la canalisation, préfabriquée par l'entreprise SPAC, a été mise en place sur la rampe de lancement par la foreuse 100T de HDI. Le tirage de la canalisation s'est ensuite déroulé sans problème. Cette opération a duré 24 heures pendant lesquelles les équipes se sont relayées pour ne pas interrompre l'opération.

La canalisation est maintenant raccordée à la raffinerie. Grâce au partenariat engagé très tôt dans ce projet par Total et HDI, une situation gagnant - gagnant a été créée : elle a permis au maître d'ouvrage d'optimiser le délai de réalisation des travaux, tout en respectant ▽





9



10



11



12

son budget, et a donné à HDI l'opportunité d'exprimer pleinement son savoir-faire et son expertise.

Pour ce chantier, l'entreprise a obtenu le prix Tytan Award 2010 du magazine polonais "Inzynieria Bezwykopowa" (Trenchless Engineering) qui récompense le meilleur projet européen de l'année, ainsi que le "Trophée du sans tranchée 2013" de la FSTT⁽¹⁾ pour avoir repoussé les limites d'utilisation de ces procédés, alternatives aux classiques travaux de pose de canalisations avec ouverture de tranchée.

TRANS ADRIATIC PIPELINE : DIMENSIONS ET COMPLEXITÉ

Parmi les chantiers à l'étranger auxquels a participé ou participe HDI, le projet TAP (Trans Adriatic Pipeline) constitue une référence en raison de ses dimensions et de la complexité des horizons géologiques traversés.

Sur ce chantier, HDI est associée à Spiecapag, filiale d'Entrepose (Groupe Vinci) pour la construction en EPC (Engineering, Procurement, Construction) de trois lots de gazoducs terrestres de diamètre 1 200 mm : l'un de 185 km en Grèce, entre Kipoi et Kavala, et deux autres, totalisant 215 km, en Albanie, entre Biliisht et Topoje.

9- Extrémités de forages dirigés parallèles sortant du permafrost en Alaska.

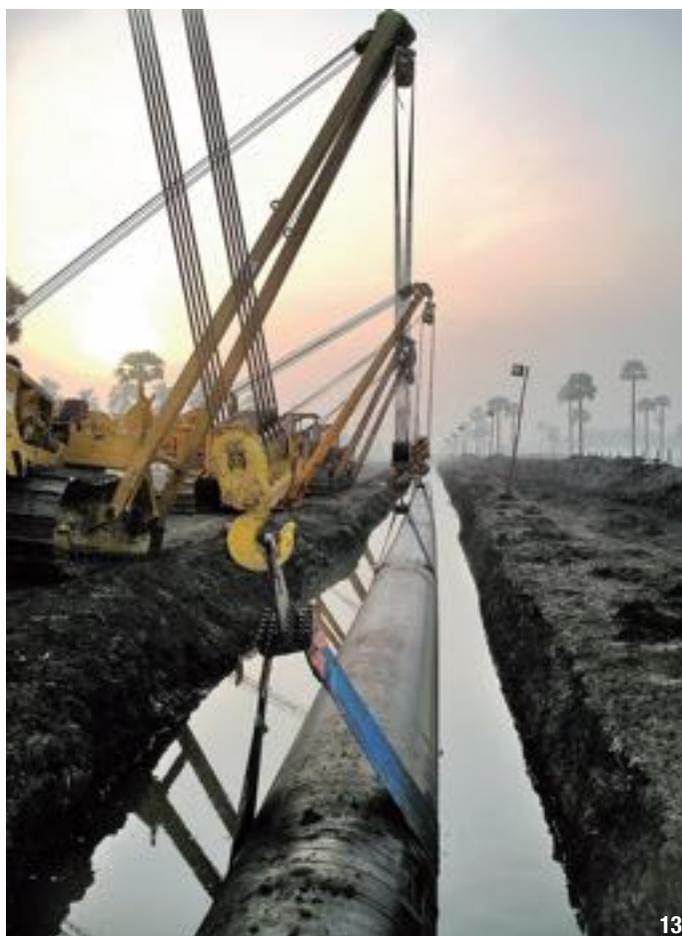
10- Point de sortie d'un forage pilote pour la traversée de la Colville River en Alaska.

11- Canalisation sur rouleaux en phase de tirage dans le trou foré sur un chantier en France.

12- Atterrage d'Addah pour FoxTrot en Côte d'Ivoire.

13- Mise en flottaison d'une canalisation DN 1200 avant son introduction dans le trou foré en Inde.

D'une longueur totale de 878 km, le gazoduc Trans-Adriatique (TAP) sera raccordé au Trans Anatolian Pipeline (TANAP) à la frontière gréco-turque, et franchira la Grèce, l'Albanie et la mer Adriatique pour se raccorder au réseau



13

de gaz au Sud de l'Italie. À son achèvement, le projet TAP permettra d'acheminer le gaz du champ de Shah Deniz II en Azerbaïdjan à l'Europe.

Le 26 décembre 2016, HDI a terminé l'installation d'un tronçon de 1100 m de long sous la rivière Semami en Albanie, premier forage d'une série en cours.

ALASKA : PREMIÈRE MONDIALE DANS LE PERMAFROST

En Alaska, dans le cadre de l'exploitation d'un champ de pétrole au nord de l'état dans la région de Prudhoe Bay, HDI a réalisé en 2008 les premiers forages horizontaux en conditions arctiques, dans le Permafrost, pour la traversée de Colville River. Il s'agissait d'une première mondiale réalisée pour le compte d'ARCO Alaska.

Le permafrost est un sol dont la température se maintient en permanence inférieure ou égale à 0°C.

Le sous-sol du permafrost est gelé jusqu'à une profondeur de l'ordre de 70 m.

L'entreprise a installé dans le plus septentrional de cet état américain, en bordure de l'océan Arctique, quatre pipelines d'une longueur unitaire de 1300 m sous cette rivière gelée sur les 12 à 14 premiers mètres de son lit et qui en hiver ne coule qu'en profondeur à l'intérieur de ce qui peut être assimilé

LE FORAGE CHEZ ENTREPOSE

Le métier du forage chez Entrepose réunit les savoir-faire de trois entités : Entrepose Drilling, HDI et Intech. Entrepose Drilling réalise des forages à grande profondeur pour l'industrie pétrolière ; des forages de géothermie haute, moyenne et basse enthalpie ainsi que des doublets géothermiques pour l'alimentation de réseaux de chaleur, en particulier en milieu urbain ; des puits de stockage d'hydrocarbures et de gaz en cavité saline ou en aquifère ; et assure des prestations de maintenance et de réhabilitation de puits.

Outre les rigs conventionnels onshore, Entrepose Drilling bénéficie d'une expertise unique, confortée par un demi-siècle d'expérience, dans l'exploitation de rigs hydrauliques modernes et automatisés, qui lui permet d'intervenir sur des projets en réduisant l'impact sur l'environnement tant dans des zones éloignées qu'en milieu urbain, sur des plates-formes étroites.

HDI (Horizontal Drilling International) et Intech sont spécialisées dans l'installation de canalisations sous obstacles naturels ou artificiels (cours d'eau, voies ferrées, autoroutes, zones côtières, etc.), qu'elles réalisent sans ouverture de tranchée par la méthode du forage horizontal dirigé. Par ailleurs, la méthode du forage dirigé appliquée à l'exécution de sections d'atterrages de pipelines marins, en synergie avec Geoclean, constitue une alternative compétitive et innovante par rapport aux techniques traditionnelles d'ensoufflage pour la liaison d'installations offshore et onshore (insensibilité aux conditions météo, réduction des délais, respect de l'environnement).

14- Record du monde sous le fleuve Vashista en Inde : 1 760 m en DN 1200.

à un tunnel d'eau liquide circulant sur un sous-sol gelé. Dans cette région où les travaux ne peuvent être réalisés qu'en hiver en raison de la géologie du terrain, la température extérieure peut descendre à -40°C, avec un ressenti proche de -70°C en raison du vent.

Dans cet environnement, les conditions de travail sont évidemment très particulières et demandent des équipements adaptés tant en ce qui concerne les équipes que le matériel.

Le champ pétrolier de Prudhoe Bay est situé dans la région de Alaska North Slope. Il est exploité par BP. Découvert en 1968 et mis en exploitation en 1977, ses réserves initiales de 13 Gbbl en font le plus gros gisement des États-Unis et le troisième d'Amérique du Nord après Cantarell et les sables bitumeux de l'Alberta.

AU BRÉSIL : FORAGE ASCENSIONNEL

« Si notre activité classique est de forer sous des rivières, il nous arrive également de forer dans des conditions très inhabituelles, poursuit Denis Pellerin. Au Brésil, par exemple, dans la région de Pantanal située en bordure de la Bolivie, il s'agissait de transférer du gaz bolivien destiné à alimenter une centrale électrique brésilienne. Nous avons réalisé le franchissement de trois crêtes montagneuses par forages horizontaux et, notamment, le premier forage horizontal dit "ascensionnel". Il s'agissait de forer de bas en haut un tunnel incliné de 1 km de long et de diamètre 750 mm, avec un dénivelé de 70 m, afin d'installer la canalisation de gaz dans le tunnel ».

ROISSY CHARLES DE GAULLE : NI VU, NI CONNU SOUS LES PISTES

Sur l'aéroport de Roissy - Charles De Gaulle, Aéroports de Paris avait besoin de faire passer des lignes électriques très haute tension (THT) de 225 kV sous les pistes d'envol et les taxiways sans interrompre le trafic.

Dans le cadre de ce chantier, HDI a réalisé deux forages parallèles guidés par gyroscope optique et équipés de gaines d'une longueur de 1500 m chacun en diamètre 550 mm sans occasionner la moindre gêne aux mouvements des avions. C'est l'un des avantages de cette technique : les forages sont réalisés sans perturber l'environnement, qu'il s'agisse d'activité industrielle ou de faune et de flore.

Dans ce même domaine de l'installation de lignes THT, HDI a effectué 17 franchissements d'obstacles - rivières, routes et autoroutes - avec 4 forages directionnels par franchissement, d'une longueur de 100 à 750 m chacun dans une zone d'une quarantaine de kilomètres sur le projet d'interconnexion électrique France-Espagne dans les Pyrénées Orientales.





15

© HDI (ENTREPOSE GROUP)

UNE TECHNIQUE QUI S'EST DÉMOCRATISÉE

Le métier est en développement régulier car il répond parfaitement aux impératifs de protection de l'environnement. Alors qu'à l'origine les domaines d'activités du forage horizontal étaient essentiellement liés au gaz et au pétrole, il s'est ouvert à l'électricité et à l'eau et, globalement, à tout ce qui transite dans une canalisation, d'autant que les prix de réalisation sont devenus, dans la majorité des cas, compétitifs avec les méthodes classiques nécessitant l'ouverture d'une tranchée. Le respect de l'environnement, l'absence de

nuisances, la maintenance beaucoup plus aisée des lignes enterrées par comparaison avec les lignes aériennes ont contribué à ce qui apparaît comme une démocratisation du procédé.

« Il est un autre domaine qui est en train de s'ouvrir au procédé, indique Denis Pellerin, celui des "atterrages" c'est-à-dire des liaisons finales, sous les plages ou les falaises, sous la zone de marnage, entre la terre et la mer sans endommagement de la côte : pour les prises d'eau ou les émissaires en mer, qu'il s'agisse d'usines de traitement d'eau, de fermes éoliennes mais aussi de terminaux de gaz et de pétrole ».

HDI a ainsi réalisé de nombreux atterrages au Brésil, en Côte d'Ivoire, au Maroc, au Royaume-Uni et en Corse. Une activité qui combine deux spécialités : le forage dirigé et les travaux maritimes. Pour cette dernière, HDI s'associe souvent à Geoclean, autre filiale du groupe Entrepose.

15- Chantier d'atterrage de Sud Capixaba au Brésil.

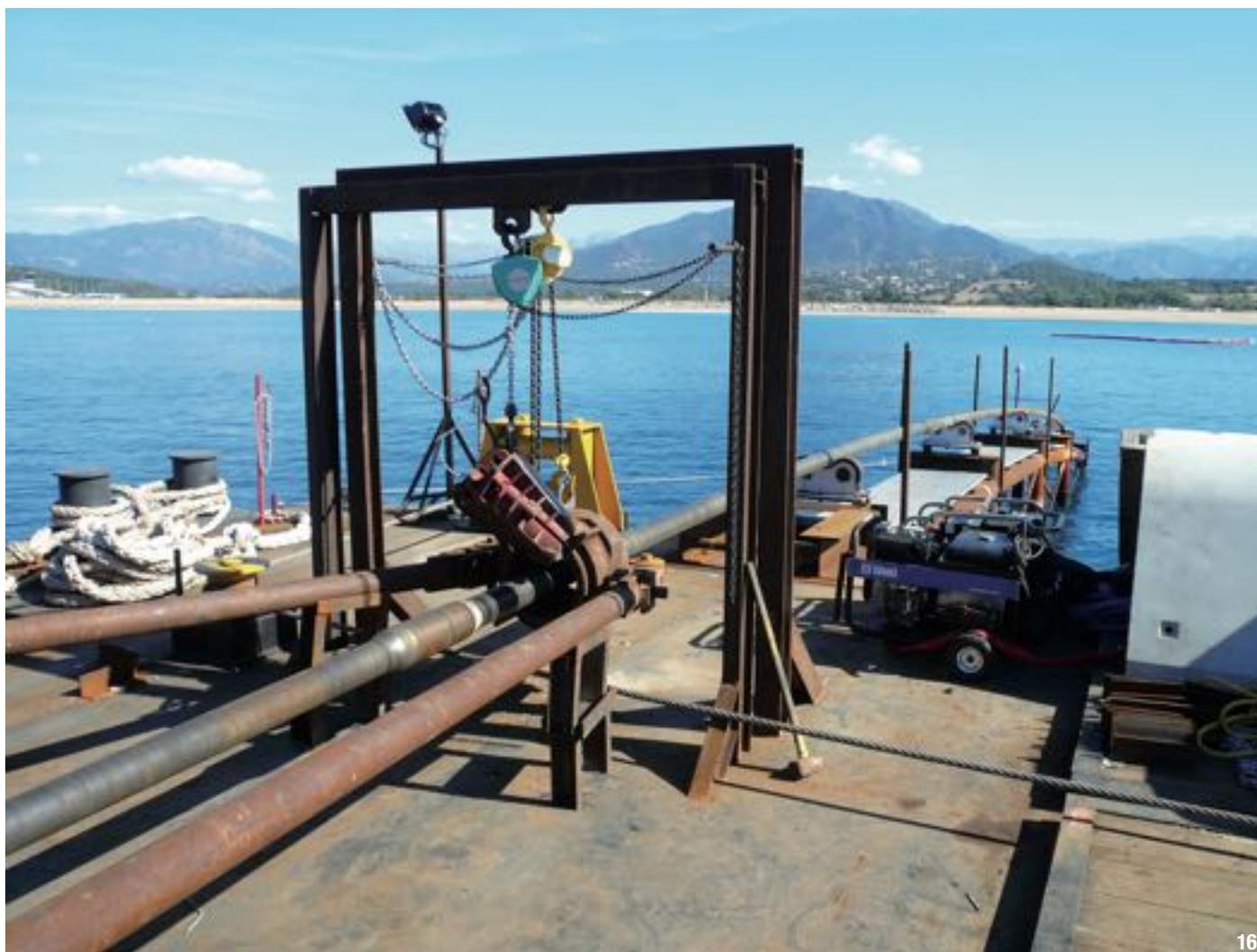
16- Atterrage en Corse.

OBJECTIFS CONCRETS EN FRANCE ET À L'ÉTRANGER

Plusieurs objectifs sont déjà planifiés pour les années à venir. Outre la poursuite du Trans Adriatic Pipeline en Albanie et Grèce, HDI est très avancée sur une opération au Mexique ainsi qu'en Côte d'Ivoire.

Au Mexique, il s'agit d'un pipeline de grand diamètre avec des forages de 1 400 m en diamètre 1 050 mm.

En Côte d'Ivoire, le canal de Vridi serait élargi en vue de rendre le port d'Abidjan plus compétitif. Cet aménagement a pour but d'approfondir le tirant d'eau du canal pour permettre au port de



16

© HDI (ENTREPOSE GROUP)



17- Travaux de nuit sur un chantier de forage dirigé en Côte d'Ivoire.
18- Sortie en mer d'un forage dirigé pour un émissaire à Papeete, à 60 m de profondeur, réalisé fin 2015. Pour ce chantier, HDI a foré deux trous parallèles de 340 m chacun, sous la barrière de corail pour ne pas l'endommager.



© HDI (ENTREPOSE GROUP)
17

recevoir de plus grands navires. « Il y a plusieurs projets qui devraient être mis en œuvre, notamment la creusée du canal de Vridi, dont la passe va être à -20 à l'entrée de la mer et à -17 au niveau des quais ».

En France, HDI travaille pour le compte de TIGF (Transport et Infrastructures Gaz France) à Lacq au déplacement,

à la réhabilitation et au renforcement de canalisations de gaz naturel dans le sud-ouest de la France.

Pour répondre à l'évolution du marché du gaz naturel, sécuriser l'approvisionnement du territoire et rester concurrentiels, les transporteurs de gaz européens doivent diversifier leurs sources d'approvisionnement.

C'est dans cette perspective que TIGF construit de nouveaux gazoducs dans le sud-ouest de la France. Ceux-ci permettent de développer l'interconnexion gazière entre l'Espagne et la France, et de sécuriser les approvisionnements dans le sens sud/nord, à partir de l'Afrique du Nord (Algérie) via l'Espagne.

Le sud-ouest de la France joue, dans ce contexte, un rôle-clé pour l'Europe grâce à sa proximité avec l'Espagne (et le Maghreb) et à la présence d'un centre de stockage souterrain à Lussagnet. Les projets ne manquent pas. □

1- **FSTT** : « France Sans Tranchée Technologies », anciennement « Comité français pour les travaux sans tranchée ».



© HDI (ENTREPOSE GROUP)
18a



18b



© HDI (ENTREPOSE GROUP)
18c



18d



1
© RITHIDETH KI

LE TUNNEL DE LA BORNE ROMAINE SÉCURISE L'A8

AUTEURS : VINCENT DUMOULIN, DIRECTEUR DE TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY TUNNELS - LIONEL FANTIN, DIRECTEUR DE PROJET, CAMPENON BERNARD SUD EST

CE TUBE UNIDIRECTIONNEL À 3 VOIES, QUI ACCUEILLERA LE TRAFIC MONTANT EN DIRECTION DE L'ITALIE, PERMETTRA LA MISE EN SÉCURITÉ DE L'AUTOROUTE A8 AVANT LA BRETELLE DE SORTIE MONACO. UN OUVRAGE DE 755 M DE LONG, CREUSÉ À L'EXPLOSIF, SOUMIS À DES CONTRAINTES SÉCURITAIRES ET ENVIRONNEMENTALES PARTICULIÈREMENT DRASTIQUES.

La section de l'autoroute A8, entre Nice-Est et la Turbie sur la commune de la Trinité, jouxte le massif de la Leuzéria au lieu-dit de la Borne Romaine. La géologie particulière du site, conjuguée aux phénomènes pluviométriques, engendre un glissement lent mais régulier des couches superficielles de terrain, phénomène qui existe probablement depuis des centaines d'années. Pour éviter tout risque aux usagers et anticiper une future éventuelle accélération du processus, Vinci Autoroutes a procédé à une première phase de sécurisation en 1996/1997, entre les PR 205,600 et 206,250, en déplaçant les voies de circulation. La chaussée Sud, moins exposée aux problématiques de glis-



2
© CEDRIC HELSY

sements, a ainsi été ripée, en terrasant dans les contreforts du massif constitué d'horizons calcaire très durs. L'axe Nord, qui accueille la circulation descendante venant de Monaco et en

1- Percement du tunnel.
2- Vue de la tête Ouest pendant le creusement.

1- Tunnel driving.
2- View of the West portal during tunnel driving.



direction de Nice, a été basculé en lieu et place du tronçon Sud. Ces travaux se révélant malheureusement insuffisants, Vinci Autoroutes a décidé d'engager, il y a six ans, une procédure beaucoup plus lourde et radicale en optant pour la création d'un tunnel de 755 m (pente 5,2% dans le sens Ouest/est) de longueur à 3 voies de circulation. Cet ouvrage unidirectionnel de 14 m d'ouverture maximale, situé 1 km avant la bretelle de sortie Monaco, accueillera donc le trafic Sud en direction de l'Italie, tandis que la circulation Nord sera une

3- Marinage des déblais.

4- Dumper en tunnel.

5- Membrane d'étanchéité en tunnel.

3- Excavation mucking removal.

4- Dumper in tunnel.

5- Waterproofing membrane in tunnel.

nouvelle fois déplacée sur la chaussée Sud réalisée lors de la première phase. À noter que cette dernière a, au préalable, été confortée lors d'une opération de renforcement lourde, par pieux, dès 2012. Dans la pratique, les travaux se sont déroulés à l'explosif, par l'intermédiaire d'un robot de foration à trois bras, réalisant 180 trous en moyenne, en suivant une progression d'ouest en est. La configuration du chantier, coincé entre l'autoroute et le massif particulièrement abrupt, aurait rendu un percement par l'est quasi impossible -

notamment en raison des risques de circulation liés à la proximité de la bretelle de sortie en direction de Monaco. Vinci Autoroutes a donc imaginé, dès la conception du projet, d'aménager, côté Ouest, une zone d'accès dédiée au chantier (figure 2) et permettant ainsi l'évacuation des déblais de creusement (100 000 m³) ainsi que l'approvisionnement des matériaux en toute sécurité. À noter que, toujours pour garantir des conditions de sécurité maximales, les quinze derniers mètres du tunnel ont été réalisés depuis la tête Est, ▷



© RITHIDETH-KI



6

© RITHIDETH KI

les déblais y étant provisoirement stockés puis évacués par l'ouest une fois la continuité de l'ouvrage effective.

L'aspect sécurité a été, en fait, le leitmotiv du projet, ce paramètre conditionnant jusqu'à la longueur des volées. Les plans de tir, réalisés par un bureau d'études spécialisé, étaient calculés en fonction de l'impact potentiel des explosions sur l'environnement. C'est ainsi que, dans les zones particulièrement sensibles (terrains de moindre cohésion, phases de démarrage, proximité de l'autoroute), les volées n'ont pas dépassé 0,90 m, alors qu'en régime de croisière la progression se déroulait dans une fourchette de 2 à 3 m, chaque nouveau tir étant subordonné à l'étude des indicateurs du tir précédent : vibrations, hors profil, qualité du rendu...

Pour les 100 premiers mètres, chacun des tirs séquentiels, effectué sous contrôle d'une batterie de capteurs sismiques et phoniques, s'est déroulé sous coupure complète de l'autoroute, soumise à autorisation préfectorale, celle-ci s'effectuant obligatoirement entre 12 et 14 h avec la contrainte de ne pas dépasser 15 minutes. Ce délai très serré qui incluait le chargement de la séquence, le balisage, le passage des patrouilleurs sur le tronçon concerné afin de constater l'absence de tout véhicule immobilisé, mais aussi le contrôle des infrastructures secondaires (une route située en contrebas ainsi que des chemins de randonnée

passant au-dessus du tunnel). Les vérifications d'usage, effectuées en compagnie d'un représentant de la maîtrise d'œuvre, une fois le tir terminé, a été parfaitement respecté au cours des 223 tirs réalisés, les équipes réussissant même fréquemment à descendre sous la barre des cinq minutes avec, parfois, des records à quatre minutes !

6 & 7- Coffrage roulant pour le bétonnage de la voûte.

6 & 7- Travelling form for roof concreting.

Un timing performant qui a permis de boucler le creusement en un peu plus de 14 mois, soit avec plus de 4 mois d'avance sur le planning prévisionnel qui tablait sur 18 mois (figure 1).

À noter que le projet comprenait également la réalisation des niches de sécurité et la construction d'une galerie de secours de 82 m (ouverture de 3,40



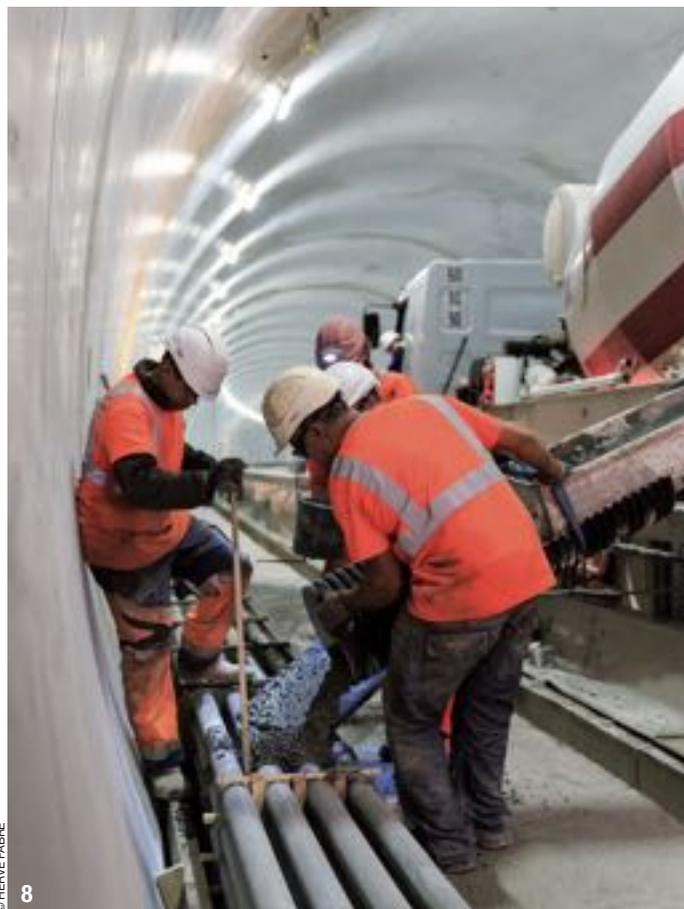
7

© RITHIDETH KI

à 3,60 m), descendante dans l'axe Nord/sud (pente 4%), celle-ci ayant nécessité une campagne de 30 tirs d'explosifs. Pour reprendre la chronologie logique du chantier, des travaux de purge, destinés à éliminer les blocs instables éventuellement présents au front de taille et en voûte, faisait suite au tir. Ces purges étaient effectuées au moyen d'une pelle de 50 t équipée d'une fraise ou d'un BRH (un engin de 40 t, doté des mêmes équipements était prévu en secours). Le marinage et l'évacuation des déblais étaient quant à eux respectivement assurés par un chargeur (figure 3), muni d'un godet de 4 500 litres, et trois dumpers de 30 t (figure 4). Une première couche de béton projeté fibré (voie humide)

8- Bétonnage du multitubulaire.
**9- Pose d'une ré-
 seau EU en tunnel.**

**8- Multitube
 concreting.**
**9- Installing a
 sewerage net-
 work in tunnel.**



© HERVÉ FABRE

8

était ensuite mise en œuvre, au moyen d'un robot de projection (matériels également redondants afin de pallier toute défaillance mécanique), pour garantir la mise en sécurité immédiate des abords du front de taille. La campagne de soutènement se poursuivait par la pose d'équipements choisis en fonction de la qualité du terrain et de l'environnement rencontrés : cintres lourds ou boulons (voir encadré), avec maillage adapté. Une deuxième couche de béton (non fibré) était ensuite projetée afin de créer un revêtement régulier, l'état de surface devant, bien entendu, être compatible avec la pose de la membrane d'étanchéité (figure 5). L'épaisseur cumulée de la coque en béton se situe entre 10 et 20 cm, cette valeur étant évidemment soumise aux aléas du terrain et aux hors profils. Le bétonnage de la voûte du tunnel, une fois réalisés radier, sous-banquettes et banquettes, a été effectué par l'intermédiaire d'un coffrage roulant métallique (figures 6 et 7), l'intervention étant décomposée en 60 plots de 12,50 m (auxquels s'ajoutent deux plots plus courts à chacune des extrémités), chacun des coulages nécessitant, en moyenne, 7 à 9 h d'intervention. ▷



© HERVÉ FABRE

9



10

© CHANTIER

Le volume mis en œuvre était compris dans une fourchette de 180 à 320 m³ (valeur moyenne 220 m³), l'épaisseur finale de la voûte (45 à 60 cm) étant, là encore, fonction de la géologie et du profil exact généré par les tirs.

Le C30/37 employé, élaboré dans une centrale monégasque, était adjuvanté afin de garantir une ouvrabilité de deux heures - ceci afin de faire face aux aléas de circulation - la formulation, relativement classique, devant néanmoins répondre à toutes les contraintes auxquelles est soumis un ouvrage d'art extérieur, notamment en termes d'agressivité eu égard à l'utilisation de sels de déverglaçage.

Le respect du planning nécessitait, par ailleurs, de pouvoir décoffrer rapidement. D'où le recours à une formule garantissant une résistance de 15 MPa à 20 heures. Pour contrôler l'obtention de cette valeur clef, le béton était également instrumenté par maturométrie (trois capteurs intérieurs et une sonde extérieure), le procédé permettant d'accéder à une mesure en temps réel des paramètres de résistance.

La structure de l'ouvrage étant faite, les équipes se sont attelées à la réalisation des réseaux en tunnel. De part et d'autre de la chaussée sont acheminés les câbles électriques haute tension et basse tension et l'ensemble des connexions aux équipements de sécurité de l'ouvrage (caméras, détection incendie, ventilateurs, éclairages... - figure 8).

Les réseaux humides permettent de collecter les eaux claires du massif, bloquées par le complexe d'étanchéité, et les eaux de chaussées sont dirigées vers un bassin de rétention. Pour mener à bien ces travaux, 40 km de collecteurs et fourreaux ont été posés en 3 mois (figure 9).

Les travaux de chaussées ont été réalisés par Eurovia. Les équipes ont dû se plier aux contraintes lourdes de l'environnement, à savoir : le travail

10- Mise en place des enrobés.

11- Vue des travaux de génie civil sur la tête Ouest.

10- Placing asphalt.

11- View of civil engineering work on the West portal.

de nuit pour assurer une liaison et une disponibilité optimale avec la centrale d'enrobés, l'obligation de ne faire appel qu'à des camions équipés de bennes pousseurs, la nécessité de mettre en œuvre une ventilation puissante au droit de l'atelier d'application des enrobés. En parallèle, les équipes de génie civil ont réalisé les ouvrages à l'air libre, à l'est et à l'ouest de l'ouvrage. Côté amont, un réservoir de stockage d'eau destiné à alimenter le réseau incendie a



11

© JEROME CABANIEL



12

© JÉRÔME CABANEL

été construit. Coté aval, c'est un bassin de rétention qui été réalisé. Pour sécuriser les 2 têtes, vis-à-vis des chutes de blocs du massif, les équipes ont réalisés des voiles d'une hauteur dépassant 11 m à l'aide de modules préfabriqués. Ces éléments ont été posés avec précision par des grues mobiles de 90 à

12- Vue des travaux de génie civil sur la tête Est.

12- View of civil engineering work on the East portal.

200 t. Pour ces ouvrages possédant également une fonction architecturale forte, la tolérance de pose a été inférieure au centimètre (figures 11 et 12). Le génie civil étant achevé et les chaussées réalisées, les équipementiers sont entrés en action pour rendre fonctionnel l'ouvrage (éclairage, ventilation,

affichage, surveillance...) et vérifier par une marche à blanc leur bon fonctionnement.

Le 18 octobre 2016, à 5h30, le premier usager empruntait le tunnel, marquant la fin de cette grande aventure pour les entreprises de construction du groupe Vinci. □

FICHE TECHNIQUE

MAÎTRE D'OUVRAGE : Vinci Autoroutes

MAÎTRE D'ŒUVRE : Egis tunnels

COORDONNATEUR SPS : Veritas

COORDONNATEUR ENVIRONNEMENT : Seged

ENTREPRISES : Groupement Campenon Bernard/Gtm Sud/Eurovia/Soletanche Bachy/Soletanche Bachy Tunnels

DÉBUT DES TRAVAUX PRÉPARATOIRES : décembre 2013

PREMIER TIR : mars 2014

FIN DU GÉNIE CIVIL : mars 2016

QUANTITÉS PRINCIPALES

DÉBLAIS : 100 000 m³

BOULONS SCELLÉS + PLAQUES : 10 000 kg

BOULONS TYPE SWELLEX : 28 000 m

CINTRES HEB 220 : 70 t

BLINDAGE : 5 t

BÉTON PROJETÉ (FIBRÉ ET NON FIBRÉ) : 5 000 m³

BÉTON DE REVÊTEMENT : 16 000 m³

ARMATURES : 200 t

ABSTRACT

THE BORNE ROMAINE TUNNEL ENSURES SAFETY ON THE A8

VINCENT DUMOULIN, SOLETANCHE BACHY - LIONEL FANTIN, CAMPENON BERNARD

The Borne Romaine Tunnel is a one-way 3-lane tunnel 755 metres long. It ensures safety for a lane of the A8 motorway subjected to a landslide. The tunnel was dug by explosive (blasting-hole spacing ranging from 90 cm to 3 m). The presence of the motorway meant that significant safety measures were required. After digging and laying a waterproofing membrane, the roof was concreted using a travelling form. The West and East portals were developed using prefabricated modules. □

EL TÚNEL DE LA BORNE ROMAINE PROTEGE LA A8

VINCENT DUMOULIN, SOLETANCHE BACHY - LIONEL FANTIN, CAMPENON BERNARD

El túnel de la Borne Romaine es un túnel unidireccional de 3 vías de 755 m de longitud que protege un carril de la autopista A8 que ha sufrido un deslizamiento de tierra. El túnel ha sido perforado con explosivos (en tramos de 90 cm a 3 m). La presencia de la autopista ha exigido importantes dispositivos de seguridad. Tras la perforación y la colocación de una membrana de estanqueidad, la bóveda se ha revestido de hormigón mediante un encofrado rodante. Las bocas Oeste y Este se han acondicionado con módulos prefabricados. □



1
© CLARA ARNOULD - INGEROP

RN19 : UN CHANTIER DE PAROIS MOULÉES INNOVANT ET DE GRANDE AMPLEUR

AUTEURS : KARIM ZIDOUH, DIRECTEUR DE TRAVAUX, ARCADIS - CLARA ARNOULD, CHEF DE PROJET, INGEROP

DANS LE CADRE DE LA DÉVIATION DE LA RN19 À BOISSY-SAINT-LÉGER, UNE TRANCHÉE COUVERTE DE 770 M EST RÉALISÉE. POUR ASSURER LA TENUE AU FEU DE CETTE TRANCHÉE COUVERTE, IL A ÉTÉ CHOISI LA MISE EN ŒUVRE D'UN BÉTON À « ÉCAILLAGE LIMITÉ » POUR LA DALLE DE COUVERTURE MAIS ÉGALEMENT POUR LES PAROIS MOULÉES. L'« ÉCAILLAGE LIMITÉ » EST ASSURÉ PAR L'AJOUT DE FIBRES DE POLYPROPYLÈNE DANS LE BÉTON. POUR DÉFINIR LE DOSAGE EN FIBRES, DES ESSAIS AU FEU ONT ÉTÉ CONDUITS PENDANT LA PHASE PRÉPARATOIRE (ESSAI DE SÉLECTION ET ESSAI DE CONVENANCE). SUITE À CELA, LA MISE EN ŒUVRE DES PAROIS MOULÉES AVEC UN BÉTON FIBRÉ S'EST EFFECTUÉE SANS DIFFICULTÉ.

Dans le cadre de la déviation de la RN19 sur la commune de Boissy-Saint-Léger (Val de Marne), une tranchée couverte d'environ 770 m a fait l'objet d'une solution innovante pour la tenue au feu des parois moulées. Le présent article décrit les études et essais nécessaires à la réalisation d'un béton à écaillage limité pour ces parois (figure 1).

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

L'opération se situe dans le département du Val-de-Marne (94). Elle a pour objet la déviation de la RN19 sur la commune de Boissy-Saint-Léger dans sa section comprise entre la RN406 à Bonneuil-sur-Marne et la RD94E à Villecresnes. Ce projet constitue la première étape d'un programme global consis-

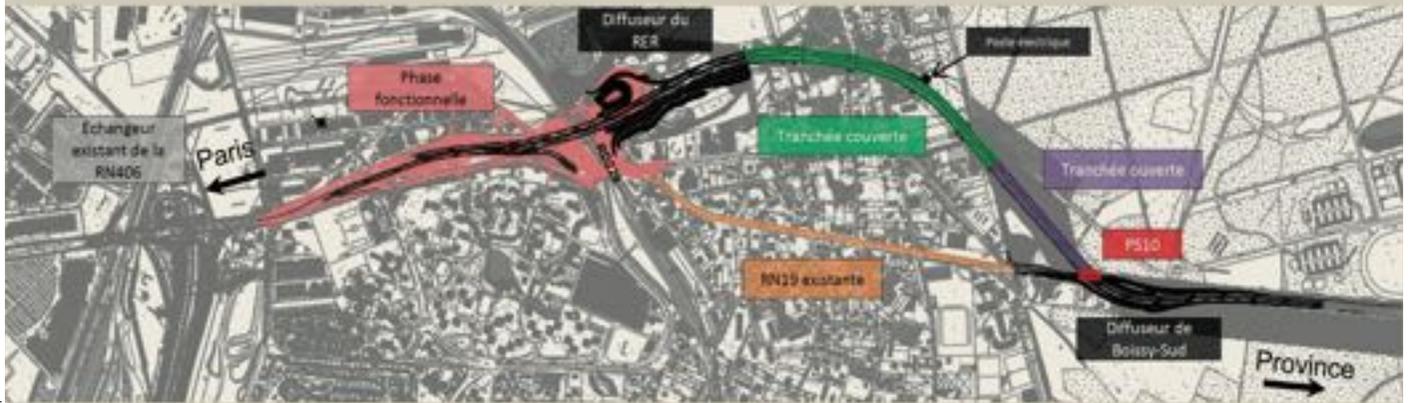
**1- Réalisation
des parois
moulées.**

**1- Execution
of diaphragm
walls.**

tant en l'aménagement de la RN19 en voie express sur la totalité du barreau de liaison entre la RN406 (Voie de Deserte Orientale du Val-de-Marne) et la RN104 (Francilienne).

Les caractéristiques actuelles de la RN19 ne lui permettent pas d'assurer sa fonction de desserte du quart Sud-Est de l'agglomération parisienne de manière fluide, sécuritaire et sans

TRACÉ DU PROJET



SOURCE INGEROP

2

nuire au cadre de vie des communes traversées, notamment Boissy-Saint-Léger. Pour réduire les nuisances que connaît cette commune, le projet de déviation de la RN19 permet de délester le centre-ville de Boissy-Saint-Léger d'un très important trafic de transit et de soulager les villes environnantes d'une circulation parasite importante découlant des encombrements actuels de la RN19. Outre le gain de temps des déplacements, l'opération vise à augmenter la sécurité des usagers mais également à améliorer le cadre de vie

2- Tracé du projet.
3- Coupe transversale de la tranchée couverte.

2- Project alignment.
3- Cross section of the cut-and-cover tunnel.

des riverains par l'éloignement du trafic du centre de Boissy (figure 2).

La déviation consiste essentiellement en la réalisation d'une tranchée couverte de 770 m suivie d'une tranchée ouverte de 400 m.

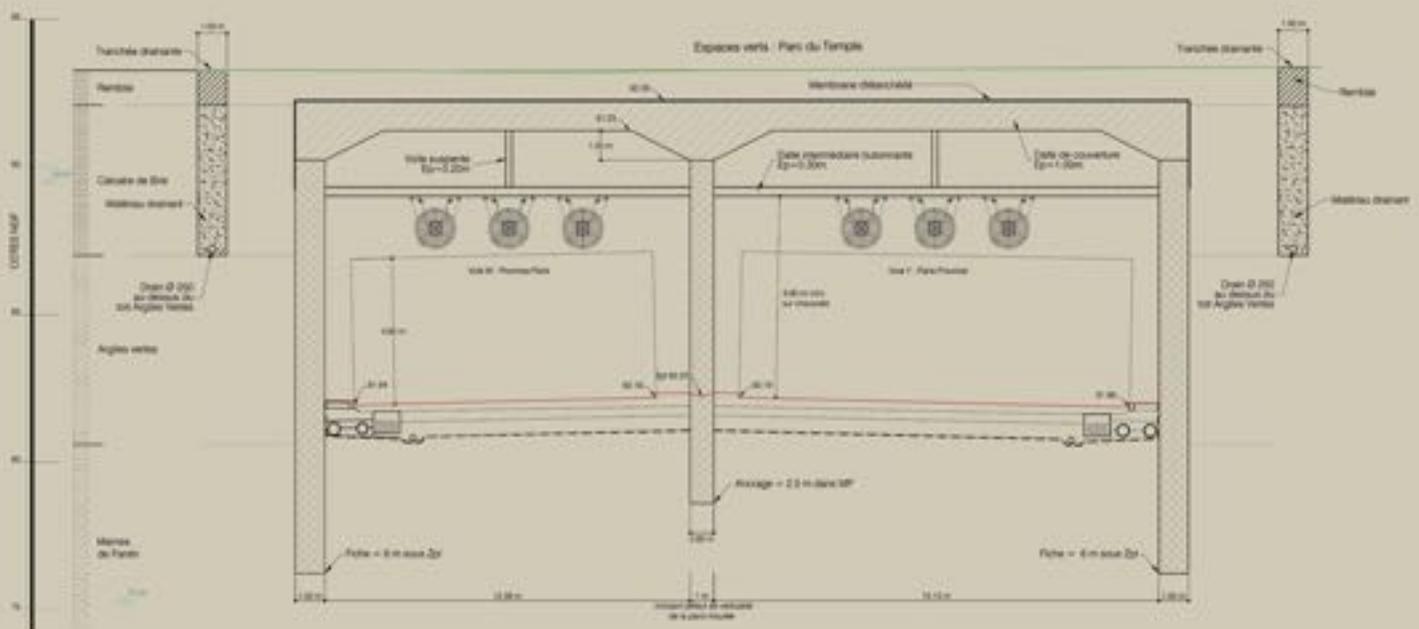
Un premier marché de travaux a été notifié en décembre 2014 correspondant à la réalisation de la tranchée couverte. La particularité majeure de ces travaux étant la protection au feu des structures principales de la tranchée couverte et notamment les parois moulées (figure 3).

OBJECTIFS DE TENUE AU FEU

Lors des phases d'étude, les discussions entre le maître d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage ont conduit à retenir différents niveaux de protection au feu dans la tranchée couverte suivant les zones : zones circulées et zones d'aménagement paysagers.

On trouvera ci-dessous des différents niveaux de tenue au feu exigibles tels que définis dans le guide du CETU : « Comportement au feu des tunnels routiers » (figure 4). ▶

COUPE TRANSVERSALE DE LA TRANCHEE COUVERTE



3

SOURCE ARCADIS

NIVEAUX DE PROTECTION AU FEU DANS LA TRANCHÉE COUVERTE

Niveaux de résistance	Tout tunnel de gabarit autorisé > 3,60 m	Tout tunnel de gabarit autorisé ≤ 3,50 m
N0	Pas de risque d'effondrement en chaîne	
N1	CN 120	CN 60
N2	HCM 120	CN 60
N3	HCM 120 + CN 240	a.) Tunnel non contigu à une structure habitée ou occupée et non situé sous une telle structure : CN 60
		b.) Autres cas de tunnel contigu à une structure habitée ou occupée ou situé sous celle-ci : CN 120
		c.) Tunnel contigu à un ERP ou établissement classé en raison du risque d'incendie au titre de la loi du 1907/1975 ou situé sous celui-ci : CN 180
		d.) Tunnel contigu à un immeuble de grande hauteur ou situé sous celui-ci : CN 240

4

SOURCE ARCADIS

Les vérifications structurelles afférentes à la tenue au feu retenues pour ce projet sont définies comme suit :

- Zone de résistance N1 : vérification au feu de type N1 + HCM60 (courbe Hydrocarbure Majorée 60) soit un dimensionnement structural de la tranchée couverte pour ces zones sous CN120 + HCM60 ;
- Zone de résistance N2 : vérification au feu de type N2 (HCM120).

La solution d'une protection par la mise en œuvre de protections passives rapportées de type plaque n'a pas été retenue dans le cadre des études. C'est pourquoi pour les différents niveaux de résistance requis, il a été demandé à ce qu'il soit mis en œuvre un béton avec un écaillage maximal limité à 3 cm sous un feu HCM pendant 120 minutes.

Cette protection au feu concerne aussi bien les dalles de couverture que les parois moulées.

Si, pour les bétons de génie civil des dalles de couvertures de nombreuses expériences et chantiers existent, pour les parois moulées, il s'agit là d'une première en France. La réalisation de parois moulées avec une protection au feu intégrée présente plusieurs inconnues en particulier le comportement du béton lors de sa mise en œuvre.

INCIDENCE DE LA PROTECTION AU FEU SUR LA RHÉOLOGIE DU BÉTON

Lors de la période préparation, le groupement titulaire du marché a procédé à un certain nombre de formulations de béton en faisant le choix d'intégrer des fibres pour arriver à un béton à écaillage limité. Une telle démarche est décrite dans les compléments au guide du comportement au feu des tunnels

rouitiers du CETU. Les difficultés liées aux exigences en terme de rhéologie du béton ont nécessité plus de 6 mois d'étude, de tests en coulage réel et d'essais au feu au Centre d'Études et de Recherche de l'Industrie du Béton (CERIB). En effet, le bétonnage des parois moulées est une opération délicate car le béton de la paroi n'est pas vibré. Se substituant à la boue bentonitique (qui avait été mise en phase provisoire pour le maintien des parois), il doit garder une rhéologie adéquate

4- Niveaux de protection au feu dans la tranchée couverte.

5- Suivi rhéologique.

4- Fire protection levels in the cut-and-cover tunnel.

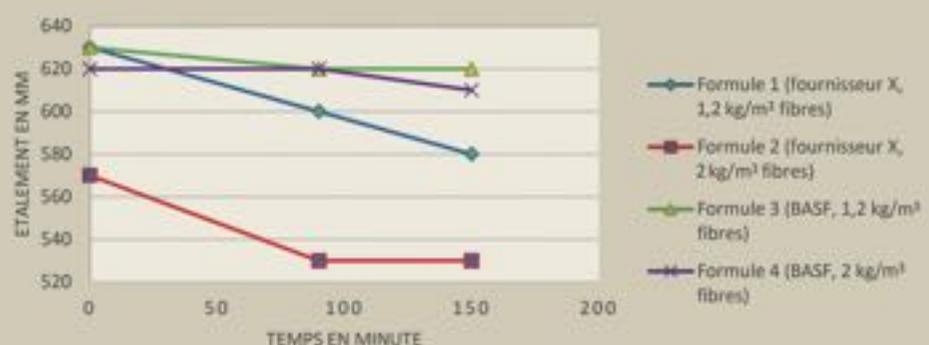
5- Rheological monitoring.

pendant toute la durée du bétonnage puisque le premier béton coulé à l'amorçage remonte jusqu'à la fin du coulage. L'ouvrabilité du béton mesurée lors des essais était de 2h30. En outre, plus le pourcentage de fibre augmente plus la rhéologie varie.

Les formulations des bétons pour les parois moulées, en fonction des critères des classes d'exposition fixés au CCTP, ont été définies par rapport au linéaire d'application. Il a été retenu dès le départ deux types de bétons : du XD3

SUIVI RHÉOLOGIQUE

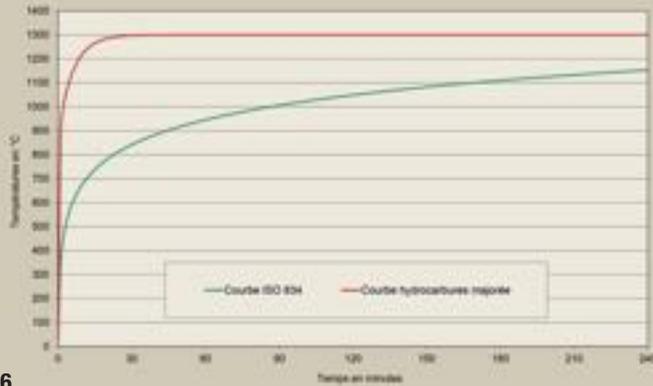
		Temps en minute		
		0	90	150
Étalement en mm	Formule 1 (fournisseur X, 1,2 kg/m ³ fibres)	630	600	580
	Formule 2 (fournisseur X, 2 kg/m ³ fibres)	570	530	530
	Formule 3 (BASF, 1,2 kg/m ³ fibres)	630	620	620
	Formule 4 (BASF, 2 kg/m ³ fibres)	620	620	610



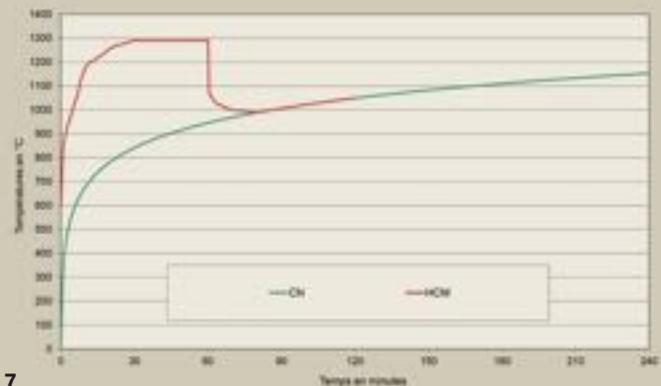
5

SOURCE BOTTE FONDATION

SOLLICITATIONS THERMIQUES



SOLLICITATIONS THERMIQUES



aux extrémités de la tranchée et XD2 pour le reste de l'ouvrage. Dans le but de limiter le nombre de bétons d'études, Botte Fondations a fait le choix de limiter le critère des classes d'expositions à une seule classe XD3 (classe maximum) pour l'ensemble de la tranchée couverte.

Selon la formulation du béton retenue, plusieurs essais avec différents types de fibres et selon différents dosages ont permis d'établir un tableau de suivi de la rhéologie (figure 5). Finalement, il a été retenu des fibres de polypropylènes MasterFiber 12 mm de BASF.

ESSAI AU FEU ET SOLLICITATIONS APPLIQUÉES

Le principal objectif des essais en plus des calculs est de justifier la tenue au feu du béton et de caractériser la propension à l'écaillage sous sollicitation de type incendie. Il convient notamment de quantifier cet écaillage après

un certain temps d'exposition, selon le niveau de sécurité retenu (N1 ou N2) et de s'assurer qu'il reste inférieur à 30 mm, comme requis dans les pièces techniques du marché.

Le niveau N1 + HCM60 exigé par le marché est plus contraignant que le niveau N1 tel que défini par la circu- ▷

6 & 7- Courbes CN et HCM.

8- Instrumentation des dallettes.

9- Dallettes face exposée au feu avant essai.

10- Dallettes face non exposée au feu avant essai.

6 & 7- CN and HCM curves.

8- Instrumentation of small slabs.

9- Small slabs - surface exposed to fire before the test.

10- Small slabs - surface not exposed to fire before the test.



© KARIM ZIDOUH - ARCADIS
8

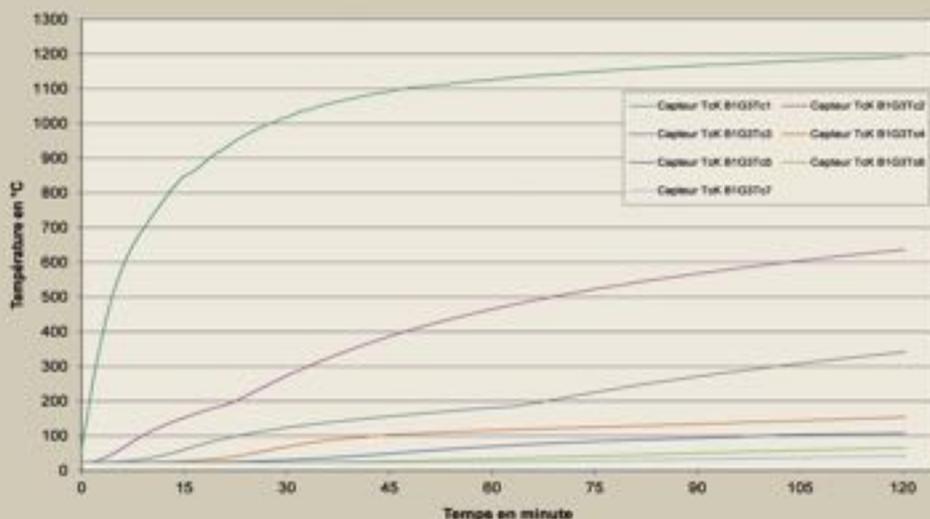


© KARIM ZIDOUH - ARCADIS
9



10

TEMPÉRATURES DE LA GRAPPE G3 DE LA DALLETTE 1,2-XD3



11

© KARIM ZIDOUH - ARCADIS

11- Températures de la grappe G3 de la dalle 1,2-XD3.

12- Photos des dalles à 120 minutes après la fin de l'essai.

13- Photos d'une dalle à 170 minutes après la fin de l'essai.

14- Numérisations de la surface entière de la dalle 1,2-XD3 après essai.

11- Températures of the G3 cluster of small slab 1,2-XD3.

12- Photos of small slabs 120 minutes after the end of the test.

13- Photos of a small slab 170 minutes after the end of the test.

14- Scanning of the whole surface of small slab 1,2-XD3 after testing.

laire interministérielle 2000-63 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national puisqu'en plus de la justification sous feu de type CN120, il est demandé de justifier la structure sous feu de type HCM60 (figure 6). Il est reconnu dans ce cas comme sécuritaire de démarrer l'essai sous sollicitations HCM puis au bout de 60 minutes d'essai, de se recalculer sur

la courbe normalisée (CN) jusqu'à la 120^e minute d'essai (figure 7).

Le niveau N2 nécessite, quant à lui une évaluation sous exposition de type HCM pendant 120 minutes.

La différence entre les deux niveaux requis (N1 + HCM60 et N2) est relativement faible et ne conduirait sans doute pas à une différence notable de formulation de béton (notamment

son dosage en fibres polypropylène). D'autant que la montée en température au cours des 30 premières minutes d'essai engendre, en général, le plus d'écaillage. Il a été ainsi décidé par Botte Fondations, de façon sécuritaire, de se conformer au niveau N2 sur l'ensemble de l'ouvrage et donc de n'appliquer que la courbe HCM120 lors des essais de résistance au feu.

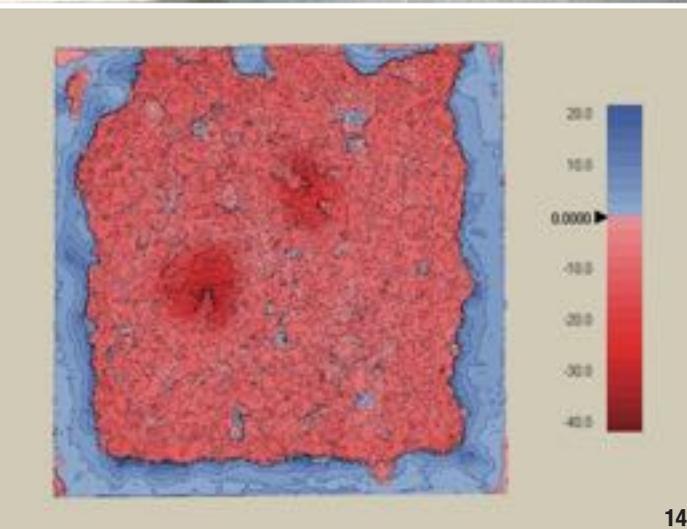


12

© KARIM ZIDOUH - ARCADIS



13



14

SOURCE CERIS

© KARIM ZIDOUH - ARCADIS

15- Pourcentage de la surface exposée au feu en fonction de la profondeur d'écaillage de la surface entière de la dalle 1,2-XD3.

16- Photo de l'installation.

17- Dalle de convenance avant l'essai, à la sortie du four et 120 min après l'essai.

15- Percentage of the surface exposed to fire according to the depth of spalling of the whole surface of small slab 1,2-XD3.

16- Photo of the setup.

17- Suitability slab before the test, on leaving the furnace and 120 min. after the test.

ESSAI DE SÉLECTION

Le but de cet essai est de choisir une formulation optimale à partir de 3 dalles d'essais fabriquées sur chantier et présentant 3 dosages de fibres différents ($1,20 \text{ kg/m}^3$, $1,60 \text{ kg/m}^3$

et $2,00 \text{ kg/m}^3$). Les dalles ont pour dimensions $1,3 \text{ m} \times 1,3 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$. Elles sont renforcées par des nappes de treillis soudé et sont équipées de 3 grappes de thermocouples répartis dans l'épaisseur et positionnées sur chaque face.

Le ferrailage de chaque dalle est identique et l'enrobage inférieur et supérieur de la dalle est de 75 mm. L'évaluation de l'essai comprend l'appréciation de la propension à l'écaillage des dalles testées, ainsi que le relevé des températures à différentes profondeurs dans le béton et le relevé de la température en face non exposée des dalles

pendant l'essai (figures 8, 9, 10 et 11). À la sortie du four, soit 120 minutes après la fin de l'essai, un gonflement d'une trentaine de centimètres de hauteur est visible sur le côté gauche de la dalle (les taches noires correspondent aux cales à béton - figure 12). Cinquante minutes après la sortie du four, soit 170 minutes après la fin de l'essai, une peau de quelques centimètres de béton tombe sur la face exposée au feu.

La face exposée au feu de chaque dalle est numérisée en 3 dimensions avant et après l'essai. Les données numérisées ont ensuite été exploi-

tées de façon à évaluer la profondeur d'écaillage et connaître le pourcentage de la surface écaillée par classe de profondeur d'écaillage et plus particulièrement les pourcentages inférieurs et supérieurs à 30 mm (figures 13 et 14). Pour réduire les impacts des effets de bord pendant l'essai sur les dalles, un rognage de 10 cm de la périphérie des dalles est effectué lors de l'exploitation des numérisations.

Les pourcentages de surface des dalles en fonction de l'épaisseur sont alors réévalués.

Ces données sont regroupées dans le graphique figure 15. ▷



15



16



17

Les essais de sélection ont conduit ainsi à retenir la formulation avec un dosage en fibre de 1,2 kg/m³ et à permettre de lancer les essais de convenances avec la formulation validée.

ESSAI DE CONVENANCE

Pour les essais de convenance, l'échantillon est une dalle de dimensions 8 x 1,6 x 0,4 m. Cette dalle est soumise à :

- Une sollicitation thermique de type HCM pendant une durée de 120 minutes ;
- Une sollicitation mécanique dont le moment de flexion produit le même niveau de contrainte de compression en face inférieure que le maximum retenu dans les calculs de dimensionnement.

La dalle est appuyée dans le four sur 2 constructions support composées de 3 poteaux et d'une poutre assemblée par boulonnage et protégées contre l'élévation de température. Elles sont placées contre les parois internes du four et espacées de 5,5 m.

Une rotule est mise en place. Elle est centrée sur chacune des poutres de la structure porteuse. Deux poutres métalliques de chargement en HEB260 de 1,6 m de longueur sont positionnées

		% de la surface de la dalle
Gonflement en mm	+5 à +7,5	1,7 %
	+2,5 à +5	37,2 %
	0 à +2,5	56,2 %
Ecaillage en mm	-2,5 à 0	2,7 %
	-5 à -2,5	0,8 %
	-7,5 à -5	0,6 %
	-10 à -7,5	0,4 %
	-12,5 à -10	0,2 %
	-15 à -12,5	0,1 %
	-17,5 à -15	0,1 %
-20 à -17,5	0,1 %	
Total		100%

18

SOURCE CERIB

sur chaque console et à 750 mm des appuis rotulés dans un lit de mortier d'épaisseur 20 mm. Deux portiques équipés chacun de 2 vérins de 50 t sont positionnés au-dessus des poutres métalliques de façon à appliquer le même effort sur chaque console de la dalle.

La charge, sur chaque console, est de 28 870 daN au départ thermique de l'essai. La charge initiale est appliquée 20 minutes avant le départ du cycle

18- Pourcentage de la surface inférieure en fonction de la profondeur d'écaillage.

18- Percentage of the lower surface according to the depth of spalling.

thermique et évolue ensuite pendant l'essai (figure 16).

Les déplacements verticaux sont mesurés depuis la face non exposée de la dalle à l'aide de 3 capteurs de déplacement à câbles mis en œuvre sur l'axe longitudinal de la dalle.

Comme pour les essais de sélection, les températures sont mesurées à l'aide de 8 pyromètres. Les 23 points de mesure de la température sont enregistrés pendant toute la durée de l'essai (figure 17).

La face inférieure (8,0 m x 1,6 m) de la dalle est numérisée en 3 dimensions avant et après l'essai. Le tableau, figure 18, donne le pourcentage de la surface inférieure en fonction de la profondeur d'écaillage de la dalle.

Les essais effectués par le CERIB ont permis de valider la formulation du béton et le dosage en fibre en adéquation avec les exigences du marché.

Les travaux des parois moulées ont démarré en juillet 2014 pour se terminer en mai 2015. La mise en œuvre du béton de parois moulées avec les fibres s'est déroulée sans difficulté particulière, les craintes initiales ayant été levées très rapidement.

La réalisation des parois moulées s'est faite suivant les règles de l'art. □

LE CHANTIER EN CHIFFRES

POUR LE PREMIER MARCHÉ DE TRAVAUX :

- PAROIS MOULÉES EXCAVÉES : 49 000 m²**
- BÉTON POUR LES PAROIS MOULÉES : 36 700 m³**
- BÉTON POUR LA DALLE DE COUVERTURE : 22 000 m³**
- ARMATURE POUR LES PAROIS MOULÉES : 3 600 t**
- ARMATURE POUR LA DALLE DE COUVERTURE : 4 500 t**
- ÉTANCHÉITÉ : 25 000 m²**
- DÉBLAIS : 500 000 t**
- DURÉE DES TRAVAUX DU MARCHÉ 1 : 33 mois**

INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE : DRIEA (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement)
DIRIF (Direction des Routes d'Île-de-France)

MAÎTRE D'ŒUVRE : Groupement Ingerop / Arcadis

CONTRÔLE EXTÉRIEUR : CEREMA - DIOA - CETU

ENTREPRISES MARCHÉ N°1 : Le Groupement Sogea Tpi / Gtm Tp / Botte Fondations / Vinci Construction Terrassement / Emulithe - Sdel / Cegelec

ÉTUDE D'EXÉCUTION GÉNIE-CIVIL TRANCHÉE COUVERTE : Isc / Botte Fondations / Ecerpt

ABSTRACT

RN19 HIGHWAY: A MAJOR, INNOVATIVE DIAPHRAGM WALL PROJECT

KARIM ZIDOUH, ARCADIS - CLARA ARNOULD, INGEROP

For the diversion of the RN19 highway at Boissy-Saint-Léger, a 770-metre cut-and-cover tunnel is being executed. To ensure the fire resistance of this cut-and-cover tunnel, it was chosen to employ a "limited spalling" concrete for the cover slab but also for the diaphragm walls. "Limited spalling" is ensured by adding polypropylene fibres to the concrete. To define the proportion of fibre, fire tests were carried out during the preparatory phase (selection test and suitability test). After that, the placing of diaphragm walls with a fibre-reinforced concrete was performed without any problem. □

RN19: UNA OBRA DE PANTALLAS DE HORMIGÓN INNOVADORA Y DE GRAN AMPLITUD

KARIM ZIDOUH, ARCADIS - CLARA ARNOULD, INGEROP

En el marco de la variante de la carretera nacional RN19 a Boissy-Saint-Léger, se ha realizado un túnel en zanja cubierta de 770 m. Para garantizar la resistencia al fuego de este túnel en zanja cubierta, se ha optado por utilizar un hormigón de "descascarillado limitado" para la losa de cobertura, pero también para las pantallas. El "descascarillado limitado" se logra añadiendo fibras de polipropileno al hormigón. Para definir el contenido de fibras se han realizado ensayos con fuego durante la fase preparatoria (ensayos de selección e idoneidad). Al término de las pruebas, la instalación de las paredes de hormigón fibrado ha podido realizarse sin dificultades. □



1

© PHOTOTHÈQUE ARCADIS

DOUBLEMENT DE LA CAPACITÉ DE LA LIGNE A DU MÉTRO DE TOULOUSE

AUTEUR : GUILHEM TEULADE, ARCADIS

POUR LEURS DÉPLACEMENTS À L'INTÉRIEUR DE LA VILLE, LES TOULOUSAINS BÉNÉFICIENT DE 2 LIGNES DE MÉTRO MISES EN SERVICE ENTRE 1993 ET 2007. CELLES-CI SUPPORTENT LA GRANDE MAJORITÉ DES DÉPLACEMENTS EN TRANSPORTS EN COMMUN DE L'AGGLOMÉRATION. DEPUIS CES MISES EN SERVICE, LE SUCCÈS DU MÉTRO TOULOUSAIN N'A CESSÉ DE CROÎTRE, NÉCESSITANT UNE AUGMENTATION DE SA CAPACITÉ EN DOUBLANT LA LONGUEUR DES RAMES DE LA PREMIÈRE LIGNE. POUR CELA, DE NOMBREUSES INSTALLATIONS ET OUVRAGES DE GÉNIE-CIVIL DOIVENT ÊTRE ADAPTÉS POUR PERMETTRE LA CIRCULATION DE RAMES DE 52 M (4 VOITURES) AUX HEURES LES PLUS CHARGÉES.

CONTEXTE GÉNÉRAL DU PROJET

La ligne A de métro de Toulouse a été mise en service le 26 juin 1993 et prolongée vers l'est en 2003. Elle permet de relier la ville nouvelle du Mirail et son université à la ville historique et d'ouvrir vers les faubourgs Est de l'agglomération. Composée de près de 17 km et 18 stations principalement enterrées (figure 2), la ligne A accueille chaque jour près de 210 000 usagers. Cumulés aux 190 000 voyages par jour sur la

1- Vue du tunnel monotube de la ligne A du métro toulousain.

1- View of the single-tube tunnel of Toulouse metro line A.

ligne B (mise en service en 2007 et qui croise la ligne A à la station Jean-Jaurès), le métro assure aujourd'hui 2/3 des voyages en transports publics de l'agglomération toulousaine.

Lors de la construction de la ligne A, pour des raisons de coût, de contraintes de réalisation et de délais, sur les 18 stations de la ligne A, seules 14 ont été exécutées avec des quais pouvant accueillir une exploitation avec des rames de 52 m dont huit avec les équipements de quai (second œuvre

et façades de quai) à 52 m. Devant le large succès commercial à la fois rapide et plus fort que prévu et l'augmentation du trafic, le SMTC a fait réaliser des études d'avant-projet système et génie civil et a décidé d'entreprendre des travaux avec pour objectif d'améliorer la capacité de la ligne A de 20 % en heures de pointe d'ici l'échéance de fin 2019 en permettant une exploitation de la ligne avec des rames de 52 m, soit l'équivalent de deux rames actuelles accouplées. ▷

Cette nouvelle configuration devra permettre de répondre à un trafic de 245 000 voyageurs par jour, 70 000 voyageurs en période de pointe (16h/19h) et 2 500 voyageurs/quart d'heure en période d'hyperpointe. L'ensemble des stations de la ligne nécessite des adaptations plus ou moins conséquentes ; parmi elles, les stations courtes souterraines (SCS) de Patte-d'Oie, Fontaine-Lestang et Mermoz requièrent une extension des ouvrages de génie-civil pour allonger la longueur des quais (figure 3), mettre en conformité le désenfumage et créer des dégagements complémentaires. Ces travaux d'extension débuteront en été 2017, pour une mise en service en décembre 2019.

LES CONTRAINTES LIÉES À L'EXPLOITATION DE LA LIGNE

Une des complexités de l'opération réside dans la nécessité absolue de limiter la gêne aux usagers du métro ainsi qu'aux circulations de surface, tout en garantissant les exigences de sécurité d'un système d'exploitation tel que le métro automatique.

Toute la conception et le phasage des travaux ont donc été bâtis afin de minimiser les impacts directs sur l'exploitation mais également sur le voisinage.

Ces compromis ont conduit aux choix suivants :

- Emprises de travaux très réduites en surface et en station et limitées dans le temps ;
- Réalisation de jour des travaux les plus bruyants, avec solutions d'atténuation des nuisances sonores ;
- Travaux dans la station existante de nuit, pendant les périodes de coupure de l'exploitation ;
- Moyens de substitution et de surveillance des ouvrages existants pour le maintien du niveau de sécurité pendant les phases chantier ;
- Possibilité d'évacuation des usagers quelle que soit la phase de travaux.

L'opération peut compter sur 3 périodes d'arrêt total de l'exploitation de 5 semaines consécutives en été 2017, 2018 et 2019. Ces 3 périodes d'interruption, lourdes de conséquences pour l'exploitation commerciale, ont gouverné le planning général de l'opération.

La conception et le phasage ont été définis afin de valoriser le mieux possible ces périodes singulières en réalisant pendant ce laps de temps l'ensemble des opérations en interface directe avec l'exploitation du métro.

PLAN DES LIGNES DE MÉTRO TOULOUSAIN



2

© PHOTO THÉRIQUE TISSÉO

2- Plan des lignes de métro toulousain.

3- Vue du quai de la station Mermoz.

2- Map of the Toulouse metro lines.
3- View of Mermoz Station platform.

DESCRIPTION DES TRAVAUX D'EXTENSION

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les projets d'extension des stations souterraines de Patte-d'Oie, Fontaine-Lestang et Mermoz s'inscrivent dans le substratum molassique toulousain (figure 4).

Cette unité est une formation sédimentaire détritico continentale déposée en chenaux imbriqués. Il en résulte des horizons disposés en lentilles d'épaisseur plurimétrique où alternent des horizons hétérogènes limoneux à sableux, des sables grossiers et des passées indurées. Le tout est recouvert de remblais et d'alluvions en épaisseur variable.

Le système hydrogéologique se compose d'une nappe pérenne contenue



3

© PHOTO THÉRIQUE ARCADIS

4- Profil géologique de la station Mermoz.

5- Vue d'ensemble des travaux de construction de la Station Fontaine Lestang en 1990.

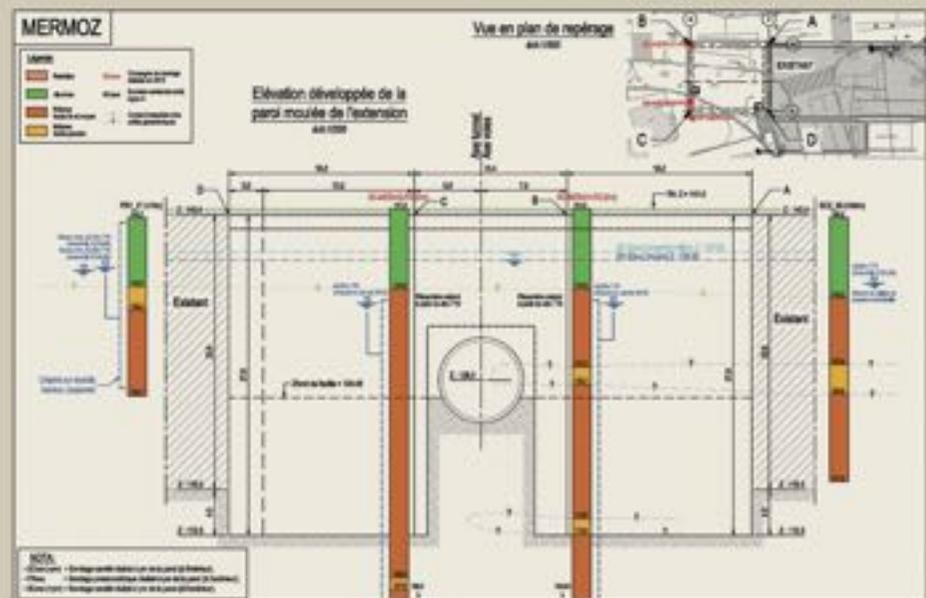
6- Vue d'ensemble des travaux de construction de la Station Mermoz en 1990.

4- Geological profile of Mermoz Station.

5- General view of construction work on Fontaine Lestang Station in 1990.

6- General view of construction work on Mermoz Station in 1990.

PROFIL GÉOLOGIQUE DE LA STATION MERMOZ



© PHOTO THÉQUE ARCADIS

4

au toit des molasses réputées imperméables, au sein des alluvions et de nappes captives pouvant être en charge au sein des passages grossiers de la molasse. Ces formations ont été largement reconnues dans la région toulousaine par les nombreux travaux souterrains, en particulier lors de la construction des deux lignes de métro de la ville.

LES STATIONS EXISTANTES

Les stations existantes sont des ouvrages souterrains de près de 20 m de profondeur, 15 m de large et de longueur variable réalisés à l'abri de

panneaux de paroi moulée de 0,8 m à 1,0 m d'épaisseur descendus de 3 m à 4 m sous le fond de fouille et butonnés provisoirement pendant les travaux d'excavation (figures 5 et 6). Ces soutènements sont aujourd'hui maintenus par 3 planchers intermédiaires de 0,6 m à 0,8 m d'épaisseur qui assurent le butonnage de l'ouvrage. Au sein des stations, les niveaux supérieurs sont occupés par les locaux techniques et les salles des billets alors que les niveaux inférieurs accueillent les quais et les sous-quais.

Les inter-stations ont été creusées au tunnelier avec pose de voussoirs pré-

fabriqués à l'avancement. Cet ouvrage monotube se compose d'anneaux de huit voussoirs de 0,34 m d'épaisseur et 1,25 m de longueur, pour un rayon d'intrados de 3,37 m (figure 7).

La longueur des quais existant étant variable d'une station à l'autre, les longueurs d'extension sont différentes pour atteindre les 52 m requis :

- Station Patte-d'Oie : 14 m ;
- Station Fontaine-Lestang : 26 m ;
- Station Mermoz : 17 m.

Le matériel roulant sur pneus circule sur les pistes métalliques ; il est guidé par des profilés latéraux qui assurent également l'alimentation des rames.

DESCRIPTION DES TRAVAUX

Les travaux d'extension des stations de Patte-d'Oie, Fontaine-Lestang et Mermoz consistent à prolonger les structures enterrées sur des longueurs de 14 à 26 m selon les stations et à réaliser des accès de secours supplémentaires tout en conservant l'exploitation commerciale. Les études de conception ont conduit à choisir des solutions classiques de parois moulées, reproduisant les techniques de soutènement déjà utilisées pour la construction des stations elles-mêmes. Les cotes des différents planchers sont également conservées pour faciliter les éventuelles



5



6

© PHOTO THÉQUE TISSECO



7 © PHOTO THEQUE ARCADIS

connexions entre les nouveaux locaux et les existants, en permettant également un meilleur transfert des efforts structurels (figure 8).

Après réalisation des panneaux de paroi moulée, les terrains sont excavés jusqu'en fond de fouille, autour des anneaux préalablement cintrés.

Ces anneaux sont découpés puis évacués, les planchers sont coulés et les ouvertures entre la station existante et les nouveaux locaux sont créés.

De nombreuses reprises en sous-œuvre sont nécessaires pour compenser les reports de charges autour des ouvrages découpés.

L'environnement des travaux :

Les travaux d'excavation seront réalisés à ciel ouvert dans un contexte urbain dense nécessitant :

- La déviation de circulation, impliquant notamment des fermetures d'avenues pendant plusieurs mois ;
- La démolition partielle d'un bâti ;
- La déviation de l'ensemble des réseaux situés dans l'emprise des terrassements.

Ces adaptations de surface ont conduit à libérer des emprises de chantier de l'ordre de 1 500 m² à 2 000 m² pour

chaque station. Ces contraintes d'emprise en surface avaient contribué, au moment de la construction de la ligne A, à réduire la longueur de ces stations.

La mise en sécurité :

La mise en sécurité du tunnel sur les 3 stations est un des enjeux principaux de l'opération. Elle est réalisée pendant les 5 semaines de la première période de coupure de l'exploitation (été 2017).

Ces travaux consistent à réaliser une coque composée de cintres métalliques et de tôles de blindage posés en intrados des voussoirs du tunnel. Ce dispositif garantit l'isolement des voies pendant tous les travaux dans l'extension, permettant de réaliser les travaux de terrassement, découpe des anneaux et bétonnage des quais sous exploitation (figure 9). Cette opération nécessite au préalable le déplacement des équipements liés au système et des équipements non liés au système : passerelles, colonne sèche, alimentation, éclairage, nombreux chemins de câbles...

La mise en sécurité permet de répondre aux exigences de sécurité suivantes :

7- Vue de la station Patte-d'Oie depuis le tunnel.

7- View of Patte-d'Oie Station from the tunnel.

- Limiter la déformation des anneaux pendant les travaux d'excavation autour du tunnel (coque rigide) ;
- Éviter la chute d'éléments sur les voies (coque continue résistante aux chocs) pendant la manutention des anneaux découpés ;
- Rendre imperméable le tunnel vis-à-vis du chantier.

Pour faciliter ces travaux et garantir les délais d'exécution et donc de remise en service du métro, cette étape est conduite à l'aide d'un train travaux pour acheminer les éléments métalliques, rendue possible par l'interruption de l'exploitation.

De la même manière, il est prévu de déposer ce système de mise en sécurité pendant la deuxième période d'interruption (été 2018).

Les ouvrages de soutènement :

Le projet prévoit des extensions de stations sur une longueur de 14 m à 26 m. Les contraintes du site (nappe alluviale de la Garonne proche de la surface, proximité d'habitation...) ainsi que la destination de l'ouvrage (quais accueillant des usagers, locaux techniques sensibles) ont conduit à choisir un soutènement par paroi moulée. Cette solution a par ailleurs montré toute son efficacité en terme d'étanchéité d'ouvrage sur les stations existantes en exploitation depuis plus de 25 ans.

Des voiles de second œuvre sont prévues en parement de ces soutènements pour masquer les éventuelles venues d'eau et pour installer un système de recueil des infiltrations vers le radier drainant de la station.

Les enjeux de réalisation des parois moulées sont multiples :

- Elles doivent se raccorder à une paroi moulée existante exécutée depuis 25 ans, et garantir une étanchéité relative ;
- Des panneaux seront exécutés en jambes de pantalon autour du tube du métro ;

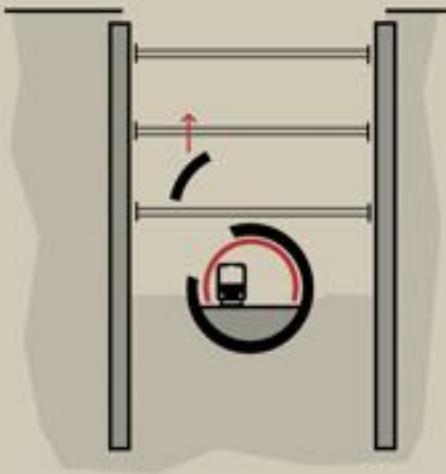
PHASAGE SIMPLIFIÉ DES TRAVAUX



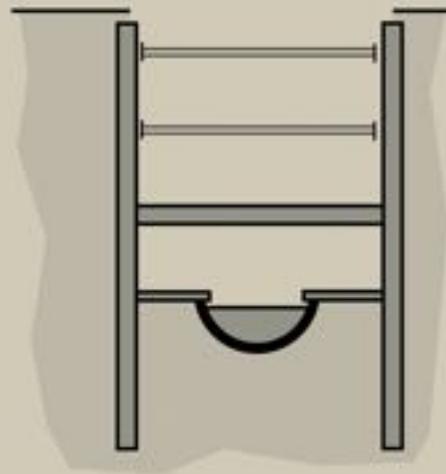
Mise en sécurité de l'exploitation (blindage) en période d'interruption



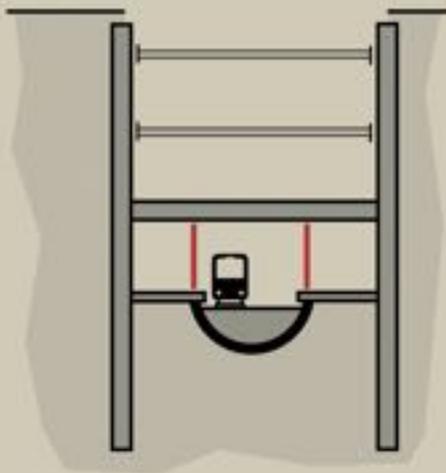
Paroi moulée et excavation autour des anneaux sous exploitation



Découpe et évacuation des anneaux de voussoirs sous exploitation



Dépose du système de mise en sécurité et réalisation des quais en période d'interruption



Pose des portes palières de nuit en interface avec les travaux de génie-civil



Réalisation du second œuvre, des installations électriques et mise en service

8- Phasage simplifié des travaux.

8- Simplified work sequencing.

- Le linéaire assez faible et les géométries particulières devant s'adapter à un ouvrage existant conduisent à des plans de panneautage très spécifiques ;
- Exécution des panneaux sous exploitation du métro.

La phase suivante de terrassement parmi les lits de butons (préférés aux tirants pour des contraintes de tréfonds), et de part et d'autre du tunnel en exploitation constitue une des phases majeures des travaux. Pendant cette étape, il est également prévu de découper et évacuer les voussoirs situés dans l'emprise de l'extension. Afin de limiter les risques vis-à-vis de l'exploitation, les mesures suivantes sont envisagées :

- Mise en sécurité par blindage ;
- Travaux effectués partiellement de nuit (pour les évacuations) ;
- Manutention des éléments hors emprise du métro ;
- Système d'auscultation automatisé et continu, avec dispositif d'alerte connecté en temps réel au poste de commandement du métro.

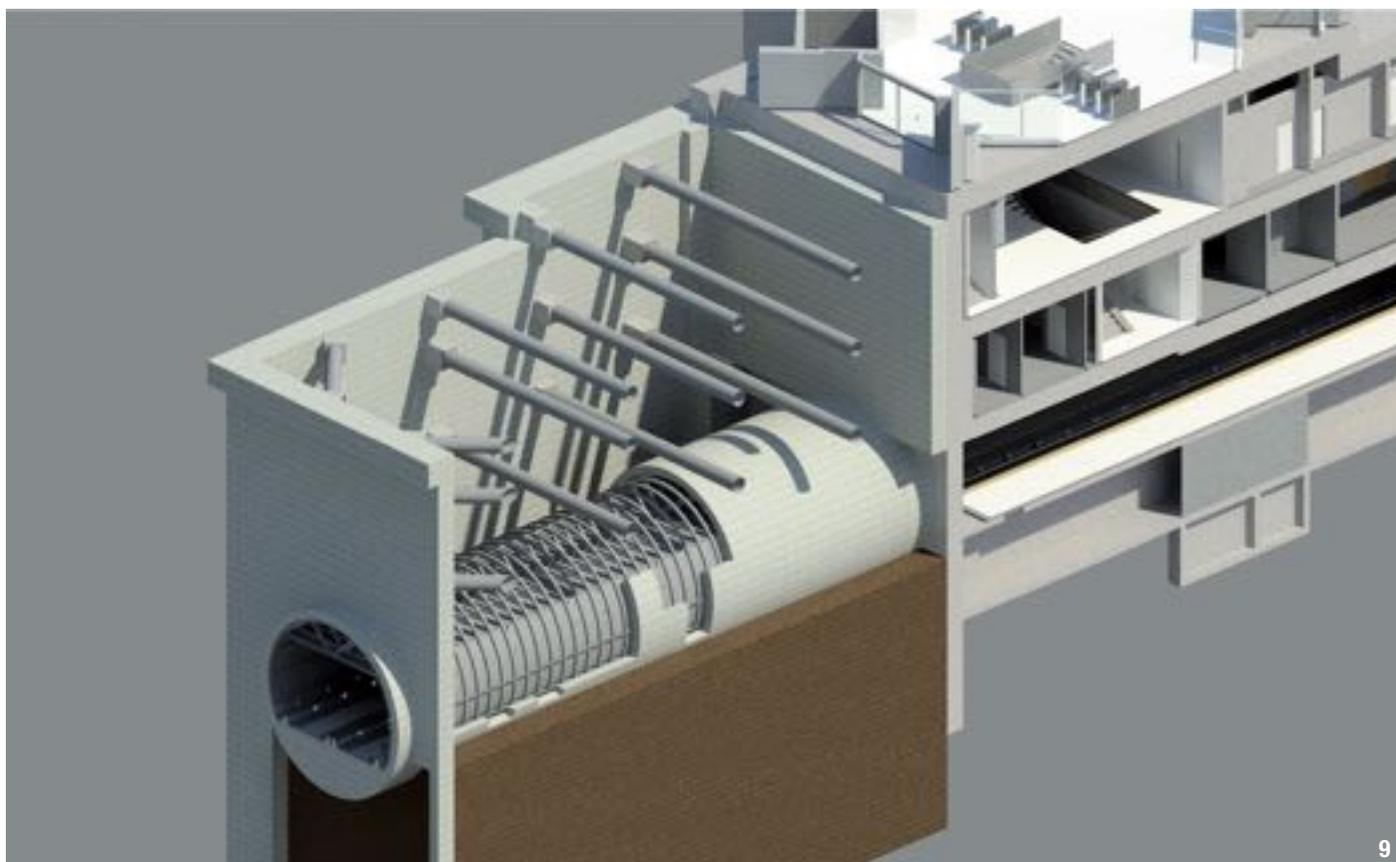
Une fois ces travaux terminés, les structures existantes sont reprises en sous-œuvre, les nouveaux planchers intérieurs sont construits et les liaisons avec les stations existantes sont découpées.

Reprises en sous-œuvre :

Les reprises en sous-œuvre comprennent principalement la réalisation d'une poutre-voile de reprise des panneaux de paroi moulée existants situés du côté de l'extension. En effet, ces panneaux supportent les planchers de la station et ne sont plus confinés côté terre. Par ailleurs, il est prévu de les découper à leur base. La poutre voile en béton armé coulée du côté de l'extension a donc pour objectif de reporter les efforts dus à ce défaut d'assise vers les nouveaux panneaux de parois moulées. De nombreux scellements sont prévus pour liasonner structurellement ces parties d'ouvrage.

Découpe des structures existantes :

Après la reprise en sous-œuvre des ouvrages existants, les parois moulées existantes de 0,80 m d'épaisseur sont découpées au niveau des quais et des émergences des issues de secours. ▷



9

© PHOTO THÉQUE ARCADIS

Ces découpes sont réalisées au câble pour limiter les vibrations, après isolation des zones concernées par des cloisons permettant de considérer l'enceinte des travaux comme un espace clos et indépendant.

Cette condition est essentielle pour garantir la sécurité de l'exploitation et des usagers, mais également isoler les quais des poussières et autres polluants.

Construction des planchers :

Des nouveaux planchers sont réalisés dans l'extension, à la même cote et avec les mêmes épaisseurs que les planchers existants. Ils sont scellés dans les parois moulées par des connecteurs laissés en attente dans le ferrailage des panneaux.

Les nouveaux volumes créés accueillent les issues de secours pressurisées et des locaux techniques dans certaines stations (figure 10). Ces planchers sont construits de bas en haut, toujours sous exploitation.

Construction des quais et nez de quai :

Les nez de quai constituent l'assise des portes palières, élément essentiel de la sécurité du métro. Cette interface est une des plus fines de l'opération en raison des tolérances millimétriques de pose et de déplacement de éléments liés au système que les nez de quai supportent. Aussi, le planning attribué à ces travaux comprend une marge de sécurité importante et une plage dédiée pour la réalisation de tests (passage de

9- Modélisation de la phase de dépose des anneaux de voussoirs.

10- Vue en coupe de la station Fontaine-Lestang avant et après les travaux d'extension.

9- Model of the segment ring removal phase.

10- Cross-section view of Fontaine-Lestang Station before and after extension works.

rame à vide, liaison avec le poste de commandement) et ainsi garantir des conditions de sécurité optimales pour les usagers avant la remise en exploitation.

Les équipements liés au système :

Le programme comprend les dégagements ou réaménagements provisoires ou définitifs, nécessaires et suffisants, de tous les équipements, installations et locaux techniques nécessaires à la réalisation des travaux d'extension à 52 m des stations ainsi que les mesures compensatoires transitoires ou définitives à mettre en place pour assurer la continuité des services et fonctions de ces équipements, installations et locaux techniques. Il s'agit en particulier :



10a



10b

© PHOTO THÉQUE ARCADIS

11- Image de synthèse des quais de la station Mermoz après travaux.

11- Synthesis image of Mermoz Station platforms after works.

- En tunnel : modification des colonnes sèches, passerelles, chemins de câbles, câbles courants forts/courants faibles, éclairages, téléphones, câbles rayonnants, ...
- En station : ajouts de clôtures et structures métalliques des quais non aménagés, éclairages, chemins de câbles, câbles courants forts et faibles, les réseaux de station, équipements billettiques ;
- Modification de la géométrie des locaux de vente, locaux d'exploitation, locaux techniques.

Le programme comprend également le réaménagement définitif à l'issue des travaux, des équipements, installations et locaux techniques existants. □



PRINCIPALES QUANTITÉS RÉPARTIES SUR LES 3 STATIONS

- 10 000 m³** de déblais excavés
- 3 500 m²** de parois moulées
- 2 500 m³** de béton structural
- 200 t** d'acier
- 120 t** de cintres et tôles pour la mise en sécurité de l'exploitation
- 50 anneaux** de voussoirs à découper et évacuer

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : S.M.T.C. (Syndicat Mixte des Transports en Commun de l'Agglomération Toulousaine).

MAÎTRE D'OUVRAGE MANDATAIRE AGISSANT AU NOM ET POUR LE COMPTE DU S.M.T.C. : SMAT (Société de la Mobilité de l'Agglomération Toulousaine).

MAÎTRE D'ŒUVRE : Groupement Arcadis/Betem/Ppa (Arcadis Mandataire).

ABSTRACT

DOUBLING THE CAPACITY OF TOULOUSE METRO LINE A

GUILHEM TEULADE, ARCADIS

The works to double the capacity of Toulouse metro line A will be performed during operation, taking advantage of three 5-week summer break periods, for commissioning at the end of 2019. These adaptations have especially significant consequences for the stations of Patte-d'Oie, Fontaine-Lestang and Mermoz, where a new station section will be built completely as an extension of the existing structure. Significant features of the work are the execution of diaphragm walls, cutting out of reinforced concrete structures, earthworks in a confined environment, the placing of centring and changes to system-related equipment. Since all these works will be performed during operation, real-time monitoring and surveillance measures will be applied in order to ensure user safety, while consolidating the solidity of the existing structures. □

DUPLICACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA LÍNEA DEL METRO DE TOULOUSE

GUILHEM TEULADE, ARCADIS

Las obras de duplicación de la capacidad de la línea A del metro de Toulouse se realizarán con la red en servicio, con 3 períodos de interrupción estiva de 5 semanas, para una entrada en servicio a finales de 2019. Estas adaptaciones tendrán una especial incidencia en las estaciones de Patte-d'Oie, Fontaine-Lestang y Mermoz, en las que se construirá una nueva parte de estación en la prolongación de la existente. Las principales obras son la realización de paredes de hormigón, el corte de estructuras en hormigón armado, los movimientos de tierras en medio exiguo, la instalación de cimbras y la modificación de equipamientos relacionados con el sistema. Dado que todas estas obras se efectuarán sin interrumpir la operativa del metro, se aplicarán medidas de auscultación y vigilancia en tiempo real para garantizar la seguridad de los usuarios, reforzando a la vez la solidez de las construcciones existentes. □

LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG - CONSTRUCTION D'UNE TRÉMIE ET D'UN PONT SOUS LES VOIES FERRÉES DU PORT AUTONOME

AUTEURS : ELVIS DARNAULT, CHEF DE PROJET, CTS - BÜLENT AYDIN, RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT STRUCTURES ET OUVRAGES D'ART, SERUE - PIERRE SCHRUFFENEGGER, RESPONSABLE COMMERCIAL, EIFFAGE CONSTRUCTION - JOËLLE MIRAULT, INGÉNIEUR TRAVAUX, KELLER - DIDIER GUTH, DIRECTEUR MÉTIER, ARCADIS

LA CONSTRUCTION D'UNE TRÉMIE ET D'UN OUVRAGE D'ART SOUS LES VOIES FERRÉES DU PORT AUTONOME, SOUS MAÎTRISE D'OUVRAGE DE LA COMPAGNIE DES TRANSPORTS STRASBOURGEOIS, FAIT PARTIE DES TRAVAUX D'EXTENSION DE LA LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG VERS KEHL, EN ALLEMAGNE. LE CHANTIER, SITUÉ SUR UN SITE TRÈS EXIGU, A FAIT APPEL À UN LARGE PANEL DE TECHNIQUES : PIEUX FORÉS, ÉTANCHÉITÉ PROVISOIRE PAR BENTONITE ET SILICATES, PALPLANCHES. LES TRAVAUX ONT ÉTÉ CONFIÉS À UN GROUPEMENT DONT EIFFAGE CONSTRUCTION EST LE MANDATAIRE.



© EUROMÉTROPOLE DE STRASBOURG 1

CONTEXTE

En 2014, la Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS), maître d'ouvrage du réseau de transport public dans le cadre d'un contrat de concession qui la lie à l'Eurométropole de Strasbourg (EMS), a démarré les travaux d'extension de la ligne D

du tram vers Kehl (Allemagne). D'un montant global de 90 M€, ils constituent un prolongement de 2,7 km du réseau strasbourgeois déjà fort de 65,4 km de lignes commerciales tramway et BHNS. Cette extension sera mise en service en avril 2017 (figure 1).

1- Extension Est - Localisation de la trémie.

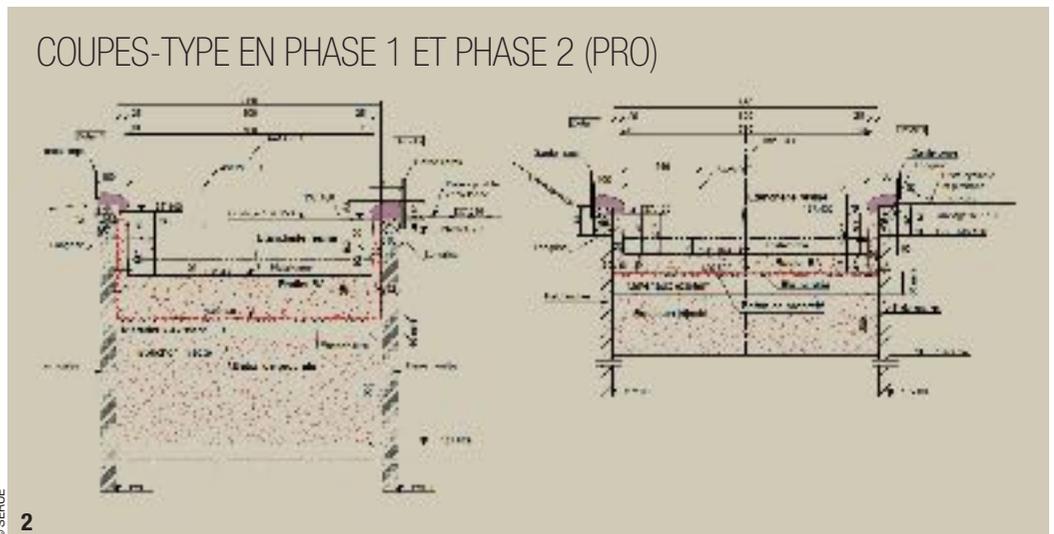
1- East extension - Location of the underpass.

Ce prolongement outre-Rhin, moteur dans le développement des liaisons transfrontalières, s'inscrit dans un projet global d'urbanisation pour se réappropriation les friches industrielles du Port Autonome d'un potentiel global de 250 ha et de 1 500 000 m² de constructibilité.

2- Coupes-type en phase 1 et phase 2 (PRO).
 3- Coupe longitudinale (PRO).
 4- Vue en plan (PRO).

2- Typical cross sections in phases 1 and 2 (road bridge).
 3- Longitudinal section (road bridge).
 4- Plan view (road bridge).

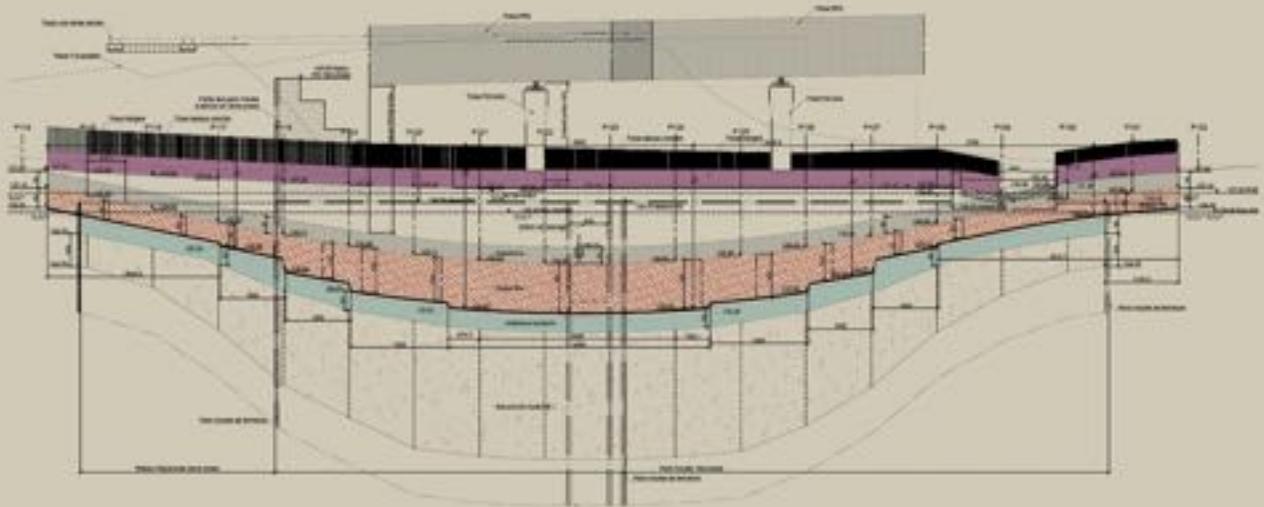
COUPES-TYPE EN PHASE 1 ET PHASE 2 (PRO)



© SERUE

2

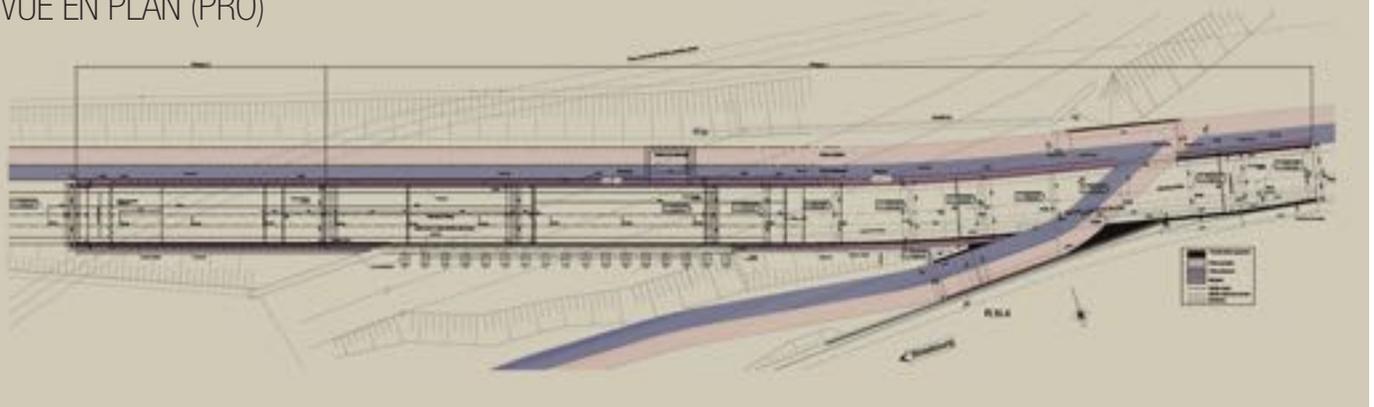
COUPE LONGITUDINALE (PRO)



© SERUE

3

VUE EN PLAN (PRO)



© SERUE

4

Pour cela, la collectivité a décidé de faire du tram le vecteur de construction des nouveaux quartiers, constituant une épine dorsale de l'urbanisation. La réalisation de cette extension nécessite la construction d'infrastructures remarquables^[1], dont un ouvrage d'art de type RaPL de lon-

gueur totale 54 m, fortement biais à 20 grades, supportant les deux voies ferrées existantes du Port Autonome de Strasbourg et une trémie de 173 m dédiée au tramway. Cette trémie est destinée à désenclaver les futurs espaces à urbaniser ainsi que les rives du Rhin.

Sous maîtrise d'œuvre Serue Ingénierie, le marché de travaux a été attribué au groupement Eiffage Construction (travaux de génie civil) et Berthold (ouvrage métallique), associé aux sous-traitants principaux Keller et Durmeyer (fondations spéciales) et Arcadis (études EXE) pour un montant total de 5,5 M€.

DESCRIPTION

La trémie permet au tramway de passer sous les voies ferrées du Port Autonome supportées par le nouvel ouvrage d'art. Il s'agit d'une structure en béton armé en U, de longueur 173 m, constituée de deux piédroits d'épaisseur 30 cm et d'un radier, ▷

découpée en 8 plots indépendants. La distance entre parois est de 8,00 m. La hauteur des piédroits varie de 0,60 m à 2,30 m. Ils sont recouverts d'une margelle architecturée en béton noir teinté dans la masse et sablé. Les piédroits sont dimensionnés pour reprendre les poussées hydrauliques des terres et des surcharges en phases définitives (figure 2).

Le profil en long est un rayon en creux de 1 250 m environ, avec un fond à 135,33 IGN (figure 3), et des raccords à 4% aux extrémités, dégageant un gabarit de passage de 4,50 m minimum au-dessus du rail. Le tracé en plan est légèrement courbe. Concernant l'assainissement, au point bas, côté Nord, une station de relevage de 25 m² environ est nichée dans un renforcement latéral. Une piste piétons-cycles venant du côté Sud (RN4) vient traverser la trémie pour rejoindre la piste qui la longe, côté Nord (figure 4). Enfin, une particularité est que le soutènement qui longe la RN4 supporte un muret de protection et doit par conséquent être en mesure d'encaisser le choc de véhicules.

LA TRÉMIE - LE PROJET DU DCE

Pour permettre de construire à sec la tranchée cuvelée (au point bas, le dessus du radier supportant la plateforme tram se trouve à plus de 2 m sous le niveau des PHEC), il a été nécessaire de prévoir une enceinte étanche provisoire. En partie centrale, pour la zone réalisée en première



5 © EIFAGE CONSTRUCTION

phase, cette enceinte avait été projetée en parois moulées. Dans le cadre du DCE, cette paroi, sur une longueur de 127 m, présentait une épaisseur variant de 0,50 m dans les zones courantes à 1,0 m, avec contreforts, dans les zones sous le tablier à construire, afin de pouvoir fonder les appuis (culées et piles). À chaque extrémité, pour la zone réalisée en seconde phase, l'enceinte avait été prévue en palplanches de type PU12. Enfin, il avait été projeté un bouchon en bentonite, formant un écran provisoire partiellement étanche aux remontées de nappe et équilibrant

5- Tablier en cours de bétonnage.

6- Coupes des appuis (variante).

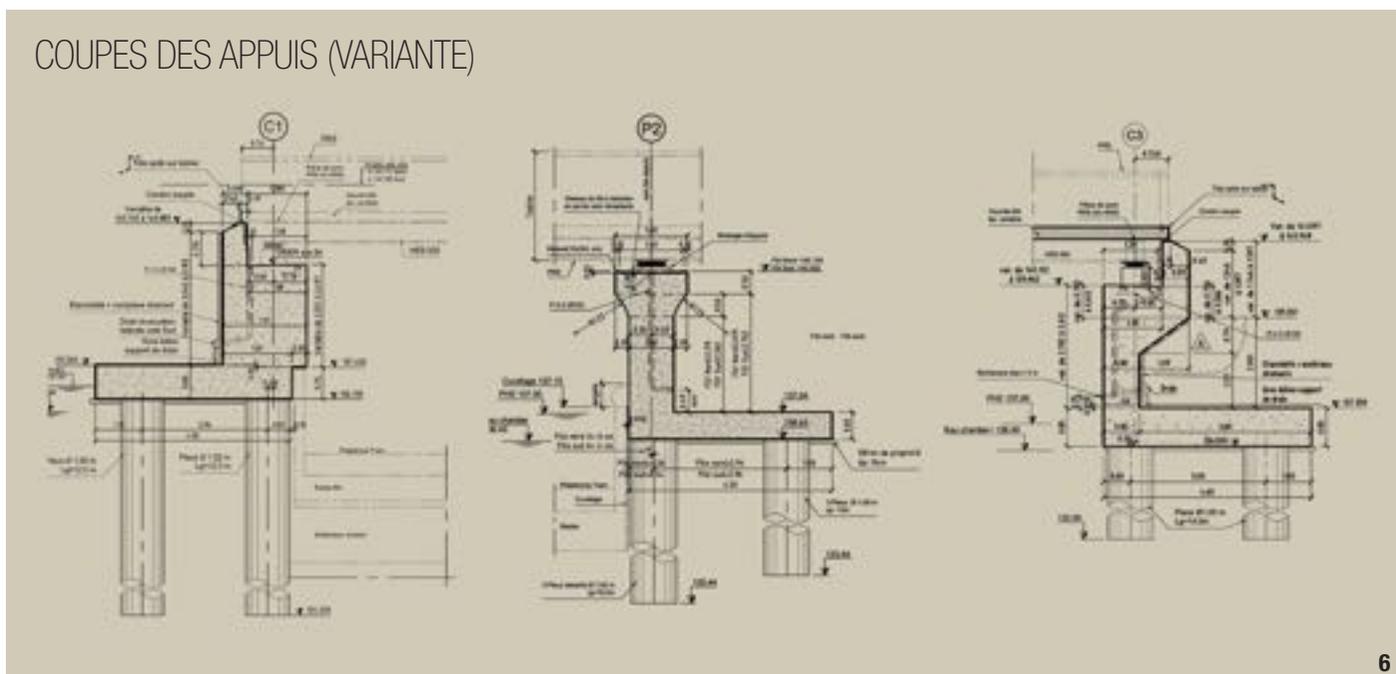
5- Deck undergoing concreting.

6- Cross sections of supports (variant).

les sous-pressions hydrostatiques en phase chantier (136,40 IGN).

Le déroulement des travaux prévoyait qu'après pompage et évacuation des remblais internes, la tranchée cuvelée proprement dite, étanchéité et ouvrage en U en béton armé, serait réalisée. L'ouvrage serait totalement étanche et suffisamment lourd pour équilibrer les poussées hydrostatiques dues à la nappe phréatique au niveau le plus haut (137,00 IGN). Le radier quant à lui devait posséder une épaisseur variable de 0,60 m à 1,50 m pour équilibrer les sous-pressions.

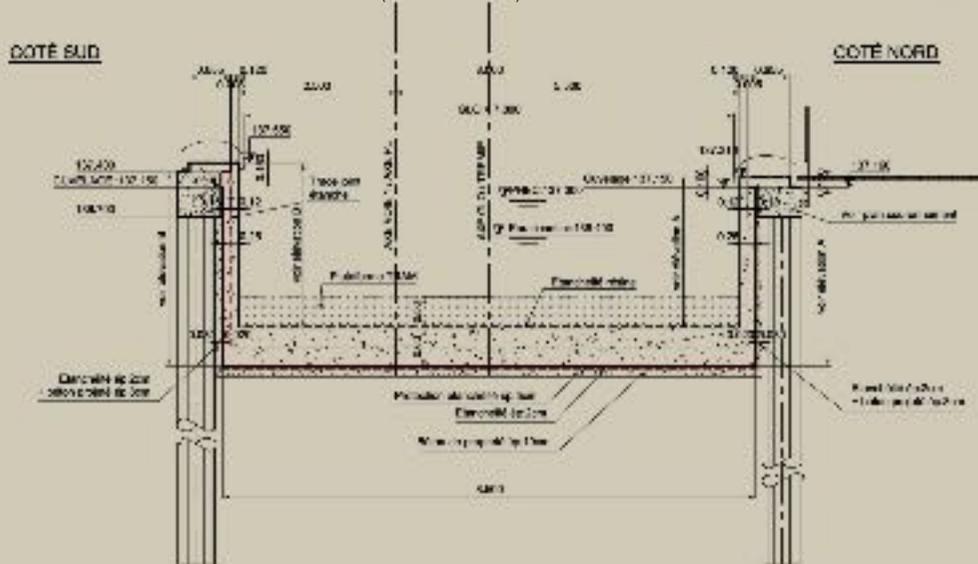
COUPES DES APPUIS (VARIANTE)



6

© ARCADIS

COUPE TYPE DE LA TRÉMIE (VARIANTE)



L'OUVRAGE D'ART

Afin de rétablir les voies ferrées du Port Autonome de Strasbourg, la trémie est franchie par un ouvrage d'art métallique de type pont rail à poutres latérales (RaPL) de longueur 54 m et qui présente la particularité d'être fortement biais (de l'ordre de 20 grades) (figure 5).

Le maintien de la circulation ferroviaire pendant les travaux étant impératif, préalablement à la réalisation de l'ouvrage, les voies ferrées, en remblais, ont été déviées ce qui a conduit au phasage de construction en deux temps évoqué précédemment et en particulier à réaliser un dispositif de soutènement provisoire côté Sud des voies, afin de ne pas engendrer d'instabilité de la plateforme ferroviaire. Le tablier repose sur trois appuis, les deux culées C1 et C3, et la pile centrale P2. Une particularité du projet est que les fondations de la culée C1 (côté Sud) et la pile centrale P2, doivent également jouer le rôle de soutènement provisoire. Les culées massives sont en béton armé (pour C1, épaisseur 2 m, longueur moyenne 36 m, hauteur 2,85 m), avec des murs en retour. Elles supportent les appareils d'appui placés sous la charpente métallique, ainsi que les butées parasismiques. La pile P2 est constituée de 2 fûts indépendants (section oblongue de largeur 3 m, d'épaisseur 1 m et de hauteur 2,70 m en moyenne). Dans le DCE, les appuis étaient fondés sur des parois moulées renforcées, le cas échéant, par des contreforts.

VARIANTES ET TRAVAUX

Lors de la réponse à l'appel d'offre, le groupement a proposé des solutions variantes concernant les fondations des appuis, les soutènements courants, l'étanchement de la boîte et la stabilisation des éléments de la trémie vis-à-vis des sous-pressions. ➤

7- Coupe type de la trémie (variante).

8- Réalisation des pieux sécants à l'aide d'une foreuse Llamada 90.

9- Mises en œuvre des canules d'injection.

7- Typical section of underpass (variant).

8- Execution of secant piles using a Llamada 90 drill.

9- Placing injection nozzles.



La variante relative aux fondations a consisté à remplacer les barrettes par des pieux forés tubés de diamètre 1 m, réalisés par l'entreprise Durmeyer. Comme la culée C1 et la pile P2 ont une partie de leurs fondations qui font également office de soutènement, certains pieux sont des pieux sécants (sous C1 : 24 pieux courants et 28 pieux sécants de 12,50 m, sous chaque fût de P2 : 3 pieux courants de 13 m et 2 pieux sécants de 16 m, sous C3, hors trémie, 35 pieux de longueur 14 m).

Le schéma statique de l'ouvrage a été modifié : le point fixe longitudinal a été déplacé de la pile P2 vers la culée C3 et les points fixes transversaux sur les deux culées. Outre la justification de la résistance, il a été vérifié les conditions de déplacement limites propres aux ouvrages ferroviaires sous charges de freinage/démarrage.

À noter que, compte tenu du biais important, les effets longitudinaux (respectivement transversaux) ont plus d'effet transversal (respectivement longitudinal).

En dehors des zones de fondation des appuis de l'ouvrage d'art, les parois de soutènement ont été réalisées par l'entreprise Keller, en pieux sécants forés à la tarière creuse de diamètre 0,62 m et sur un linéaire de 3 200 m (figures 6 à 8).

Dans le projet initial, l'étanchéité et la stabilité du fond de fouille était assurée par un bouchon injecté d'épaisseur 3,90 m au point le plus bas. La variante a consisté à exécuter un bouchon injecté double épaisseur silicate-ciment de 1 400 m² en fond de fouille, à l'injection de coulis de ciment-bentonite et de gel de silicate à l'aide de containers multi-pompes (figure 9).

Enfin, la dernière variante majeure a consisté à proposer le blocage vertical du U par des consoles émanant des poutres de couronnement pour résister aux sous-pressions maximales. La solution de base prévoyait une stabilisation



10

© EIFFAGE CONSTRUCTION

par le poids du radier épais (épaisseur jusqu'à 1,50 m). Le radier de la variante a pu, par conséquent, être réalisé en épaisseur constante de 60 cm.

PHASAGE - PLANNING - TRAVAUX

La période de préparation de 3 mois a été largement mise à profit pour la mise au point de la variante retenue et démarrer les études d'exécution.

Comme évoqué plus haut, le dévoiement provisoire des voies ferrées du Port Autonome de Strasbourg pour les besoins du chantier a imposé un phasage particulier, enchaînant les étapes suivantes :

- Construction en 10 mois de la trémie et de l'ouvrage d'art supportant les voies ferrées du Port Autonome de Strasbourg (phase 1) ;
- Rétablissement de la voie ferrée sur l'ouvrage neuf (hors marché) ;
- Réalisation en 3 mois de l'ouvrage de sortie de trémie (phase 2).

Au-delà des contraintes techniques, les

10- Trémie en cours de terrassement.

11- Pieux sécants et butons.

12- Béton projeté et membrane bitumineuse.

10- Underpass during earthworks.

11- Secant piles and stays.

12- Shotcrete and asphalt diaphragm.

→ Le manque de place : les emprises étaient exiguës, le chantier s'étirant entre la RN4 très passante et le remblai de la voie ferrée du port qui le surplombait.

L'approfondissement du profil en long jusqu'à 3 m sous le niveau de la nappe phréatique a imposé de construire une boîte étanche provisoire pour permettre la réalisation du radier définitif de la trémie. La solution mise en œuvre par Keller a permis de travailler hors d'eau pour la réalisation des éléments de la trémie, avec un débit de pompage résiduel à un niveau très faible, inférieur à 5 m³/h pour 60 m³/h autorisés. En phase définitive, ces mêmes éléments, le radier et les voiles périphériques, reprennent le rôle de soutènement et d'étanchéité.

Pour la réalisation de la paroi en pieux sécants, forés à la tarière creuse de diamètre 0,62 m sur un linéaire de 3 200 m, des murets de guide ont été mis en place, et la tarière utilisée

difficultés principales de l'opération ont résidé dans :

- Le planning : la date de rétablissement de la voie ferrée sur l'ouvrage neuf était un enjeu important ;



11



12

© EIFFAGE CONSTRUCTION



était d'un seul tenant, afin de limiter le risque de déviation de celle-ci lors de la réalisation des pieux (figure 8).

Concernant le bouchon injecté, dans le but de diminuer les risques liés au débit d'exhaure, la trémie a été divisée en 3 zones : ce cloisonnement a permis de diviser le risque de non-conformité par trois. Un suivi du phasage rigoureux avec le contrôle systématique des volumes et pressions d'injection a été mis en place tout au long du chantier pour assurer la qualité des ouvrages. Tout au long du chantier, sur une durée d'environ 4 mois, de nombreux contrôles ont été réalisés : essais d'impédance par réflexion sur les pieux, écrasement d'éprouvettes à 7 et 28 jours, perméabilité sur éprouvette de coulis de ciment bentonite. Toutes les données relevées se sont avérées conformes aux valeurs réglementaires. L'entreprise Durmeyer, quant à elle, a réalisé les fondations de l'ouvrage (pieux forés tubés en diamètre 1 000 mm).

Les terrassements ont été réalisés à l'avancement de la mise en place des butons de soutènement provisoires (figures 10 et 11).

13- Réalisation du radier et puits de pompage.

14- Piédroit sous la culée C3, coulé en béton autoplaçant.

13- Execution of the invert and pumping shaft.

14- Pier under abutment C3, cast in self-compacting concrete.

Pour assurer l'étanchéité de la trémie en phase définitive, une géomembrane bitumineuse (Teranap 431 TP de Siplast) a été mise en place. Elle s'est accompagnée de précautions d'usage pour protéger la membrane : afin d'éviter que le béton des pieux, abrasif, ne la perforé, Eiffage Construction a réalisé un béton projeté sur l'ensemble de la trémie. Après mise en œuvre, la membrane a été protégée par un géotextile et un béton de propreté. La membrane est compartimentée et des canules d'injection ont été mises en place dans

les compartiments pour pallier d'éventuelles fuites ultérieures (figure 12). Pendant l'intégralité de la phase de génie civil, le pompage a été maintenu en place (figure 13), jusqu'à ce que le poids propre de l'ouvrage, couplé au dispositif de reprise des efforts par un liaisonnement de la trémie à la tête des pieux sécants permette de reprendre les efforts liés à la poussée de la nappe. Les piédroits de la trémie ont été cofrés sur une face : les efforts ont été repris par une équerre à l'arrière des coffrages, mais également par des tiges ancrées à 45° dans le radier. Une partie du piédroit se situant sous la culée C1 a été coulée en béton autoplaçant (figure 14). □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : CTS

MAÎTRE D'ŒUVRE : Getas/Serue

MANDATAIRE - TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL : Eiffage Construction

CHARPENTE MÉTALLIQUE DE L'OA : Berthold

FONDACTIONS SPÉCIALES/SOUTÈNEMENTS/BOUCHONS : Keller

FONDACTIONS SPÉCIALES/SOUTÈNEMENTS/BOUCHONS : Durmeyer

ÉTUDES DE VARIANTES ET D'EXÉCUTION - CONTRÔLE EXTERNE

DES ÉTUDES DE SOUTÈNEMENTS ET DU BOUCHON INJECTÉ : Arcadis

SOUTÈNEMENTS EN PALPLANCHES : Schleith GmbH Baugesellschaft

[1] Articles sur la ligne D déjà publiés dans Travaux :

> Revue Travaux n°916, juillet 2015 : « Ligne D du tramway de Strasbourg - Construction d'un pont sur le Rhin ». D.Guth, M. Bort, Arcadis.

> Revue Travaux n°923 - avril/mai 2016 : « Le Pont Citadelle, un exercice d'équilibre ». N.Yazbeck, Egis Jmi - A.Giannopoulos, Egis Jmi - T.Klumb, Eiffage Métal - F.Delhomme, Gtm-Halle - F.Kissling, Soletanche Bachy France.

> Revue Travaux n°923 - avril/mai 2016 : « Un lien entre l'Allemagne et la France - Le nouveau pont sur le Rhin ». C.Cremona, Bouygues TP - D.Braet, P.Van Severen, Victor Bluyck SC - D.Guth, Arcadis.

ABSTRACT

STRASBOURG TRAMWAY LINE D - CONSTRUCTION OF AN UNDERPASS AND A BRIDGE UNDER THE RAILWAY LINES OF THE AUTONOMOUS PORT

ELVIS DARNAULT, CTS - BÜLENT AYDIN, SERUE - PIERRE SCHRUFFENEGER, EIFFAGE CONSTRUCTION - JOËLLE MIRAULT, KELLER - DIDIER GUTH, ARCADIS

The extension works on tramway line D, awarded to Compagnie des Transports Strasbourgeois by Eurometropolis of Strasbourg, got under way in 2014. They represent an extension of the Strasbourg network into Germany and will stimulate the development of cross-border links. The execution of this extension work requires the construction of remarkable infrastructure facilities, including a bridge of total length 54 metres, carrying the two existing railway lines of Port Autonome de Strasbourg, and a 173-metre underpass dedicated to the tramway. The works contract, for a total amount of €5.5 million, under project manager Serue Ingénierie, was awarded to the consortium of Eiffage Construction (leader) and Berthold, together with main subcontractors Keller, Durmeyer and Arcadis. □

LÍNEA D DEL TRANVÍA DE ESTRASBURGO - CONSTRUCCIÓN DE UNA RAMPA DE ACCESO Y UN PUENTE BAJA LAS VÍAS FÉRREAS DEL PUERTO AUTÓNOMO

ELVIS DARNAULT, CTS - BÜLENT AYDIN, SERUE - PIERRE SCHRUFFENEGER, EIFFAGE CONSTRUCTION - JOËLLE MIRAULT, KELLER - DIDIER GUTH, ARCADIS

En 2014 comenzaron las obras de ampliación de la línea D del tranvía, encargadas a la empresa Compagnie des Transports Strasbourgeois por la Eurometrópolis de Estrasburgo. Prolongación de la red de Estrasburgo hacia Alemania, este proyecto dinamizará el desarrollo de los enlaces transfronterizos. La realización de esta ampliación requiere la construcción de infraestructuras importantes, como una obra de fábrica de una longitud total de 54 m que soportará las dos vías férreas existentes del Puerto Autónomo de Estrasburgo y una rampa de acceso de 173 m dedicado al tranvía. Bajo la coordinación de Serue Ingeniería, la ejecución de las obras, valoradas en total de 5,5 M €, se ha encargado al consorcio formado por Eiffage Construction, en tanto que representante, y Berthold, asociado a los subcontratistas principales Keller, Durmeyer y Arcadis. □



1
© EIFFAGE - HERVÉ PIRAUD

TUNNELIER PRESSION DE TERRE - RETOURS D'EXPÉRIENCE

AUTEURS : ÉRIC MATHIEU, CHEF SECTEUR GÉOTECHNIQUE & TRAVAUX SOUTERRAINS, BIEP / EIFFAGE INFRASTRUCTURE -
NOMIKI KOTTAKI, CHEF SECTEUR GRAND PARIS, BIEP / EIFFAGE INFRASTRUCTURE

RÉFLEXION SUR LA DÉFINITION DES PRESSIONS DE CONFINEMENT DE CONSIGNE POUR LE CREUSEMENT AU TUNNELIER SUR LA BASE DE TROIS RETOURS D'EXPÉRIENCE DE CREUSEMENT AU TUNNELIER À PRESSION DE TERRE DANS LES FORMATIONS DU BASSIN PARISIEN.

PRÉSENTATION DES TROIS CREUSEMENTS ÉTUDIÉS

Le creusement au tunnelier dans un contexte urbain dense et sensible nécessite la définition de pressions de confinement à appliquer à l'avant du tunnelier au niveau de la roue de coupe pour garantir la stabilité du front de taille, et autour de l'excavation le long du bouclier pour maîtriser les

déformations en surface et les maintenir en dessous des seuils de tassement admissible pour les ouvrages (bâtiments, ouvrages, infrastructures, ...). En site urbain la définition des pressions de confinement de consigne est souvent gouvernée par des critères de tassement. Sur trois projets de creusement au tunnelier à pression de terre réalisés

**1- Tramway T6 -
entrée du
tunnelier dans
la station.**

**1- T6 tramway -
TBM entry into
the station.**

entre 2008 et 2016 dans des conditions proches, nous avons confronté les valeurs prévisionnelles théoriques des pressions de confinement de consigne obtenues par calculs avec les valeurs de pression de confinement réellement mises en œuvre sur le chantier.

Tramway T6 Châtillon-Vélizy-Viroflay - Lot 1 - creusement 2012-2015 (figures 1 et 2) :



© EIFFAGE - HERVE PIRAUD
2

- 1333 m de tunnel réalisés au tunnelier dans un environnement urbain ;
- Tunnelier à pression de terre d'un diamètre de 9 170 mm (tunnelier ayant réalisé le creusement du prolongement de la Ligne 12 Lot1-T1 et Lot2-S1) ;
- Géologie traversée par le tunnelier : Sables de Fontainebleau, Marnes Supragypseuses, Marnes & Caillasses et Calcaires Grossiers ;
- Creusement partiellement sous nappe : Charge hydraulique de 50 KPa dans les Sables de Fontainebleau et jusqu'à 150 KPa ;
- Couverture comprise entre 6 et 36 m.

Prolongement de la Ligne 12 Porte de La Chapelle-Marie d'Aubervilliers - Lot1-T1 et Lot2-S1 - creusement 2008-2012 :

- 3 640 m de tunnel réalisés au tunnelier dans un environnement urbain dense ;
- Tunnelier à pression de terre d'un diamètre de 9 170 mm ;
- Géologie traversée par le tunnelier : Marno-calcaires de Saint-Ouen, calcaires de Ducy, Sables de Beauchamp et Marnes & Caillasses ;
- Creusement sous nappe : charge hydraulique de 50 KPa à 220 KPa ;
- Couverture comprise entre 14 et 24 m.

Prolongement de la Ligne 14 Saint-Lazare - Mairie-de-Saint-Ouen - Lot1 - creusement tronçons 1 et 2 entre 2014 et 2016 (figure 3) :

- 3 620 m de tunnel au tunnelier dans un environnement urbain dense (2 167 m réalisés - Tr1 et Tr2) ;

2- Tramway T6 - montage du tunnelier à pression de terre.

2- T6 tramway - assembly of the Earth Pressure Balance TBM.

- Tunnelier à pression de terre d'un diamètre de 8 920 mm ;
- Géologie traversée par le tunnelier : Marno-calcaires de Saint-Ouen, Sables de Beauchamp et Marnes & Caillasses ;
- Creusement sous nappe : charge hydraulique de 20 KPa à 260 KPa (et 400 KPa ponctuellement) ;
- Couverture comprise entre 7 et 29 m.

MÉTHODES DE CALCUL DES PRESSIONS DE CONFINEMENT PRÉVISIONNELLES

Pour le projet du tramway T6, et pour celui du prolongement de la Ligne 12, le calcul des pressions de confinement prévisionnelles a été mené à partir d'une approche classique avec la redéfinition de taux de déconfinement effectifs.

Dans cette approche les taux de déconfinement classiques définis au front de taille, λ_f , et en sortie de jupe, λ_j , sont obtenus à partir de la méthode convergence-confinement en fonction de la distance au front de taille (Cette distance est nulle pour la définition du taux de déconfinement λ_f . Elle est égale à un diamètre d'excavation pour la définition du taux de déconfinement

λ_j . À cette distance du front le taux de déconfinement est λ_j est de 90 %). Ces valeurs sont caractéristiques d'un tunnel non revêtu et pour lequel aucune pression de soutènement n'est appliquée au front ou sur les parois.

Les taux de déconfinement effectifs λ_f^* et λ_j^* sont réévalués pour prendre en compte l'action sur le déconfinement de la pression de confinement appliquée par le tunnelier au niveau du front de taille P_f , et de la pression de confinement appliquée sur les parois de l'excavation le long du bouclier P_j (cas du tunnelier à pression de boue, ou cas du tunnelier à pression de terre avec confinement à l'air ou avec injection de fluide de confinement le long du bouclier). Ces corrections réduisent les taux de déconfinement classiques. La première étape du calcul correspond à la définition de la pression de confinement nécessaire pour garantir la stabilité du front de taille P_f . Elle est définie à partir de relations classiques en fonction de la nature des terrains et de la présence ou non d'une nappe. Une analyse en fourchette à partir de plusieurs méthodes peut être utile dans certains cas pour affiner le choix de la pression P_f en fonction de la sensibilité aux différents paramètres géotechniques. Très souvent cette valeur est utilisée pour définir les deux taux effectifs λ_f^* et λ_j^* . Si cela est correct dans le cas d'un tunnelier à pression de boue, cela ne l'est pas toujours dans le cas du tunnelier à pression de terre ou les pressions au front et autour du bouclier peuvent être différentes. Une fois les des taux effectifs définies, ils sont directement injectés dans un modèle aux éléments fini (EF) 2D pour

simuler l'approche puis le passage du tunnelier (bouclier) au droit de la section étudiée. L'essentiel des tassements qui se développent en surface au cours du creusement au tunnelier se produisent lors du passage du bouclier. Après le passage du bouclier, en sortie de jupe, la pose du revêtement constitué par les anneaux de voussoirs avec le mortier de bourrage injecté sous pression bloquent les tassements. Le calcul se fait par itérations successives, en augmentant progressivement la valeur de la pression de confinement servant au calcul des taux de déconfinement effectifs, jusqu'à l'obtention de tassements admissibles en surface.

L'exploitation des retours d'expérience concernant les deux projets, tramway T6 et prolongement de la ligne 12, a conduit à retenir une approche basée sur le principe de la méthode explicite pour le calcul des pressions de confinement du projet du prolongement de la Ligne 14. Dans cette méthode les pressions de confinement au front et autour du bouclier, P_f et P_j , sont définies de manière indépendante. Les mêmes méthodes que celles exposées précédemment sont appliquées pour la définition de la pression de confinement au front. La pression de confinement autour de l'excavation le long du bouclier, P_j , est directement modélisée dans le calcul EF 2D par l'application d'une pression équivalente sur la surface interne de la section. Le calcul est mené avec les taux de déconfinement classique λ_f et $\lambda_j = 0,9$. On procède également par itérations successives en augmentant la valeur de la pression de confinement P_j jusqu'à l'obtention de tassements admissibles en surface. ▽



© EIFFAGE - HERVE PIRAUD

Les pressions de confinement prévisionnelles ont été définies en fourchette pour le projet du prolongement de la ligne 14 avec une valeur minimale et une valeur maximale calculées en contraintes totales et en contraintes effectives.

Pour les trois projets, les pressions de confinement prévisionnelles (théoriques) ont été définies avec un modèle numérique 2D aux éléments finis et une loi de comportement élastoplastique avec critère de plasticité de Mohr-Coulomb, en contraintes effectives (calcul d'une surpression de confinement) ou totales (calcul d'une pression de confinement).

COMPARAISON ENTRE LES PRESSIONS DE CONFINEMENT APPLIQUÉES SUR LE CHANTIER ET LES PRESSIONS DE CONSIGNE PRÉVISIONNELLES

Les comparaisons entre les données des chantiers (pressions appliquées sur le tunnelier) et les prévisions calculées conduisent aux mêmes constats : les prévisions des pressions de confinement pour la stabilité du front sont globalement cohérentes avec les pressions appliquées. Les prévisions des pressions de confinement autour du bouclier sont systématiquement surévaluées par rapport aux pressions

nécessaires et réellement appliquées sur le chantier.

Sur les 500 premiers mètres de creusement du tunnel sur le projet du tramway T6, aucune pression de confinement n'a été nécessaire autour de la jupe, là où les calculs donnaient des valeurs de 100 à 200-300 KPa. Les tassements en surface ont été conformes aux seuils fixés. Des conclusions identiques peuvent être tirées des constats sur le creusement du prolongement de la ligne 12 avec le même tunnelier. Le creusement du tunnel du tramway T6 s'est poursuivi avec l'application d'une pression de confinement autour du bouclier. Il s'agit principalement d'une pression d'air et localement d'une pression à la bentonite. Les pressions appliquées sont inférieures aux pressions calculées (réduction de 20 à 60% par rapport aux valeurs calculées) et les tassements mesurés en surface sont quasi nuls, bien en dessous des valeurs admissibles utilisées dans les modélisations (tassements mesurés varient entre 10 et 30% de la valeur des tassements calculés).

Pour le creusement du premier tronçon du prolongement de la ligne 14 (lot 1) le constat est plus nuancé même si les prévisions restent surévaluées. Les pressions de confinement autour du bouclier qui ont été mises en œuvre

3- Prolongement Ligne 14 - assemblage du tunnelier dans la station.

3- Line 14 extension - assembly of the TBM in the station.

sur le chantier sont plus proches des pressions de consigne prévisionnelles définies à partir des calculs. Les écarts constatés restent globalement contenus dans le fuseau théorique délimité par les valeurs de calcul minimales et maximales. Ces observations confortent le recours aux calculs suivant le principe de la méthode explicite pour une définition plus réaliste de la pression de confinement autour du bouclier. Cependant les tassements réellement mesurés lors du passage du tunnelier restent très inférieurs aux valeurs seuils utilisées dans les calculs. Les tassements mesurés représentent moins de 20% de la valeur seuil prise en compte dans le calcul.

CALAGE DES CALCULS EN RÉTRO-ANALYSE

L'origine des écarts constatés entre les valeurs calculées et les valeurs chan-

tier pour les pressions de confinement autour du bouclier est diverse : caractéristiques géotechniques définies de manière conservatrice et imperfections de la modélisation.

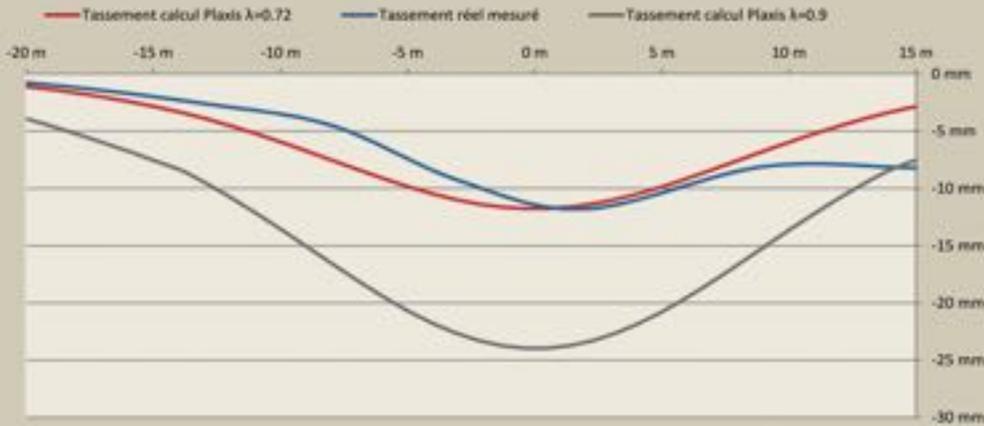
Des sections d'auscultation et instrumentées sont disponibles pour les trois projets. L'analyse du suivi des mesures lors du passage du tunnelier et l'exploitation des données de pilotage du tunnelier en termes de pression de confinement ont permis de procéder à des recalages du modèle de calcul. Sur certaines sections, de nouveaux sondages ont permis de recalculer localement le modèle géologique et le modèle géotechnique. Pour ces sections, l'incidence sur le résultat du calcul de la pression de confinement reste très marginale du fait des très faibles variations par rapport aux modèles géologiques initiaux. Les rétro-analyses ont été essentiellement axées sur le recalage du modèle numérique.

Dans un premier temps, l'ensemble des calculs de référence pour la définition des pressions de confinement prévisionnelles réalisées en suivant des méthodes classiques ont été repris en appliquant les principes de la méthode explicite.

Plusieurs calculs ont été répétés de manière identiques sur l'ensemble des sections en faisant varier à chaque

CALAGE DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Comparaison entre les déformations en surface mesurées, prévisionnelles et recalées

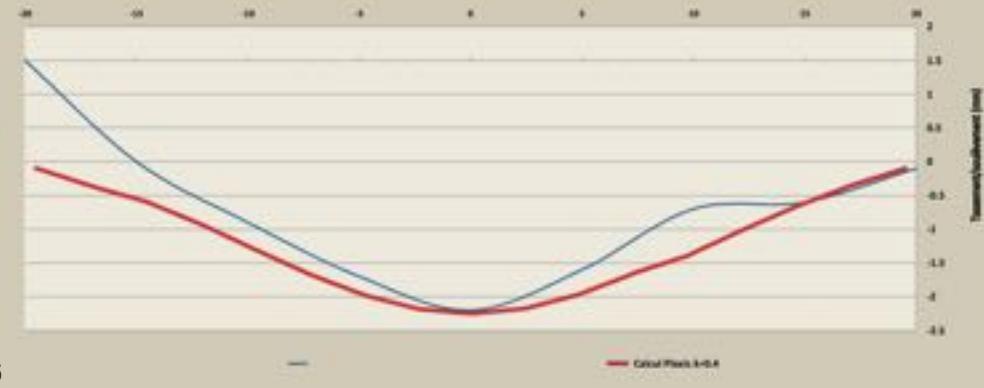


4- Calage du modèle numérique - comparaison entre les déformations en surface mesurées, prévisionnelles et recalées.

5- Calage du modèle numérique - comparaison entre les déformations en surface mesurées et recalées (les prévisions avec $\lambda_J = 0,9$ donnent 16 mm).

CALAGE DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Comparaison entre les déformations en surface mesurées et recalées (les prévisions avec $\lambda_J = 0,9$ donnent 16 mm)



4- Adjusting the computer model - comparison between measured, predicted and adjusted surface deformations.

5- Adjusting the computer model - comparison between measured and adjusted surface deformations (predictions with $\lambda_J = 0,9$ give 16 mm).

fois un paramètre du modèle jusqu'à aboutir à un modèle considéré comme le plus réaliste, permettant d'approcher au mieux la réalité du chantier.

Le paramètre le plus influent reste la définition du taux de déconfinement en sortie de jupe. C'est aussi le paramètre dont la définition est la plus délicate compte tenu de l'utilisation de la méthode convergence-confinement pour des tunnels peu profonds et de l'incidence sur le déconfinement réel des pressions de mortier de bourrage appliquées en sortie de jupe et de la vitesse de progression du tunnelier avec un blocage rapide de l'excavation par la pose de l'anneau.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

La définition des pressions de confinement en appliquant la méthode explicite donne des prévisions plus réalistes et plus proches des confinements mis en œuvre par le chantier sur le tunnelier. Cependant les valeurs calculées restent encore surévaluées par rapport aux pressions de confinement du chantier. Pour l'ensemble des sections et des conditions rencontrées, les calculs conduits en contrainte totale, même en présence d'une nappe, donnent des valeurs de pression de confinement plus proches de celles mises en œuvre sur le chantier au cours du creusement. La réduction du taux de déconfinement

en sortie de jupe, à une valeur inférieure à la valeur classique de 0,9, permet de se caler aux données du chantier. Globalement l'approche selon les principes de la méthode explicite avec un taux de déconfinement λ_J moyen en sortie de jupe compris entre 0,6 et 0,7 permet au modèle numérique d'atteindre des valeurs de tassement de l'ordre de ceux mesurées sur site avec une pression de confinement égale à celle mise en œuvre.

Les figures 4 et 5 illustrent ces résultats sur deux exemples de recalage : la courbe bleue correspond aux déformations mesurées en surface (cumulé après passage du tunnelier) ; la courbe

grise donne les déformations estimées avec un $\lambda_J = 0,9$; la courbe rouge correspond au modèle de recalage avec un taux de déconfinement λ_J réduit. Ce constat est général sur l'ensemble des rétro-analyses des sections des trois projets.

Le calage est conforme avec les valeurs suivantes : λ_J compris entre 0,5 et 0,6 pour les sections gouvernées par les Sables de Beauchamp ou les Sables de Fontainebleau ; λ_J compris entre 0,6 et 0,7 pour les zones mixtes type Sables de Beauchamp et Marnes & Caillasses ; et λ_J compris entre 0,4 et 0,5 dans les formations plus compactes. □

ABSTRACT

EARTH PRESSURE BALANCE TBM - EXPERIENCE FEEDBACK

BIEP / EIFFAGE INFRASTRUCTURE: ÉRIC MATHIEU, NOMIKI KOTTAKI

On three projects involving tunnel driving by Earth Pressure Balance TBM in Paris Basin formations, comparison between the theoretical confinement pressure and settlement values based on computer models and the values coming from the site shows that the calculated pressures are systematically overestimated. One of the main difficulties in defining the calculation parameters is the choice of deconfinement rate at the tunnel face and at the shield exit. Reverse engineering shows that in the case of an Earth Pressure Balance TBM the deconfinement rate usually adopted at the shield exit can be reduced by 25%. □

TUNELADORA DE PRESIÓN DE TIERRAS - CONCLUSIONES

BIEP / EIFFAGE INFRASTRUCTURE: ÉRIC MATHIEU, NOMIKI KOTTAKI

En tres obras de perforación con una tuneladora de presión de tierras en las formaciones de la cuenca parisina, la comparación entre los valores teóricos de las presiones de confinamiento y de los asentamientos obtenidos mediante modelos digitales y los valores procedentes de la obra revela que las presiones calculadas están sistemáticamente sobrevaloradas. Una de las principales dificultades en la definición de los parámetros de cálculo es la selección del índice de desconfinamiento en el frente de corte y en la salida de escudo. Los retroanálisis muestran que en el caso de una tuneladora de presión de tierras, el índice de desconfinamiento habitualmente elegido en la salida del escudo puede reducirse un 25%. □



1
© DR

GALERIE DE RECONNAISSANCE DU LYON-TURIN, ENTRE LES DESCENDERIES DE SAINT-MARTIN-LA-PORTE ET LA-PAZ

AUTEUR : LOÏC THÉVENOT, DIRECTEUR DÉPARTEMENT TRAVAUX SOUTERRAINS, EIFFAGE GC

LA FUTURE LIAISON FERROVIAIRE ENTRE LA FRANCE ET L'ITALIE TRAVERSERÀ LES ALPES DANS UNE ZONE À LA GÉOLOGIE COMPLEXE, SOUS DES COUVERTURES ALLANT JUSQU'À 2 500 M. LES INFORMATIONS RECUEILLIES PAR LES SONDAGES EXÉCUTÉS DEPUIS LA SURFACE NÉCESSITENT D'ÊTRE COMPLÉTÉES POUR MIEUX APPRÉHENDER LE COMPORTEMENT GÉOTECHNIQUE DES ROCHES TRAVERSÉES. LES GALERIES DE RECONNAISSANCE ATTEIGNANT LE CŒUR DU MASSIF PERMETTENT DE VALIDER LES TECHNIQUES DE CREUSEMENT ET LES TYPES DE SOUTÈNEMENTS DU FUTUR PLUS LONG TUNNEL FERROVIAIRE DU MONDE.

PRÉAMBULE

La rédaction de cet article a coïncidé avec l'épisode de pollution de nos vallées alpines. C'est l'occasion de défendre le projet de la liaison ferroviaire Lyon-Turin, parfois contesté, qui est indispensable à l'amélioration de la qualité de vie des 11 millions d'habitants de deux des régions européennes les plus dynamiques, Rhône Alpes et le Piémont italien.

Cette liaison répond à un double objectif, réduire le temps de transport ferroviaire entre Lyon et Turin mettant Paris à 4h de Milan (contre 7h aujourd'hui) mais aussi offrir une alternative au tout poids lourds qui alimente le trafic routier entre la France et l'Italie.

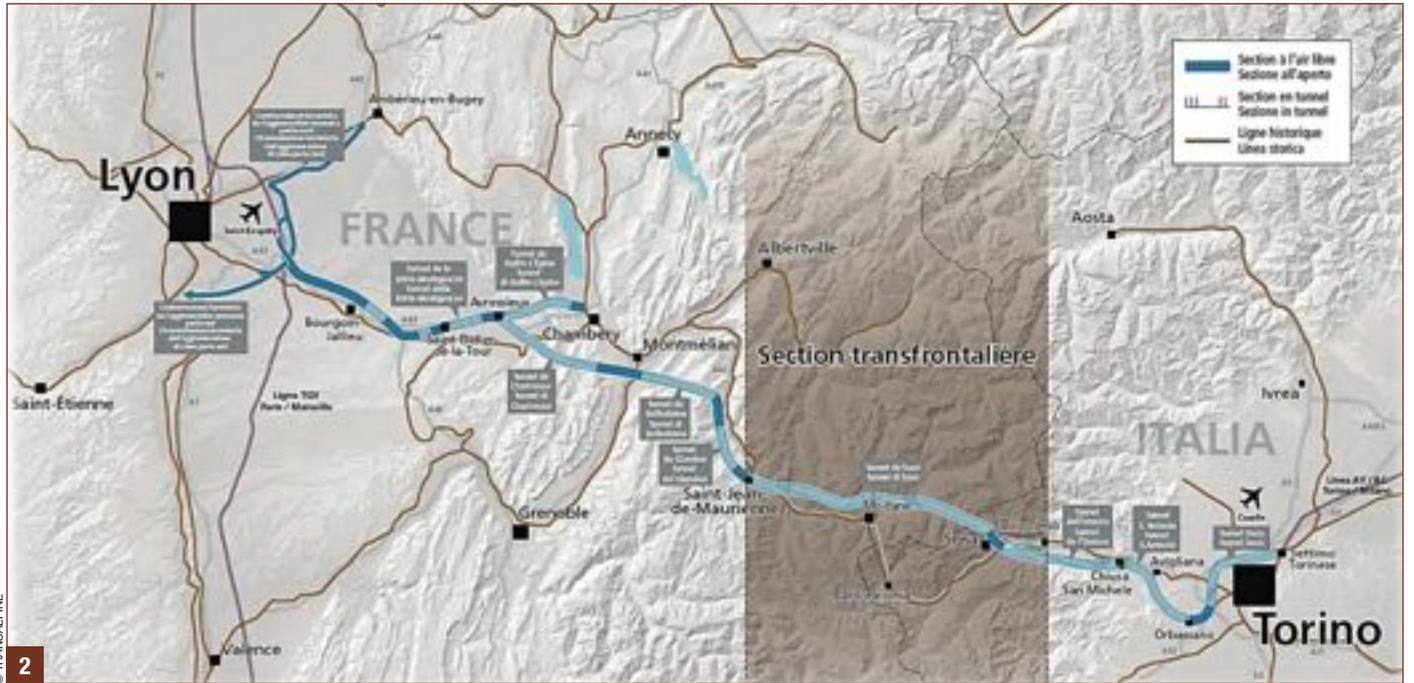
Les simulations réalisées permettent d'espérer une baisse de 40% du trafic poids lourds avec une capacité de fret portée à 40 millions de tonnes par

**1- Intersection
du tunnel de
base avec la
galerie logistique.**

**1- Intersection
of the main
tunnel with the
logistics gallery.**

an soit l'équivalent de 3 millions de camions !

Certes, le coût de ce projet, de l'ordre de 8,6 milliards d'euros, est un investissement de premier ordre mais il est financé à hauteur de 40% par des fonds européens, 35% par l'Italie et 25% par la France. Compte tenu de la durée du chantier, son impact sur le budget national n'est que de 200 millions d'euros annuels.



À titre de comparaison, l'aide à l'acquisition des véhicules propres représente 347 millions d'euros⁽¹⁾ et le budget alloué à la transition énergétique est de 5,6 milliards d'euros⁽¹⁾. Enfin il a semblé légitime d'apporter un éclairage sur la nature des travaux en cours au moment où ces lignes sont publiées.

DESCRIPTION DE LA PARTIE INTERNATIONALE DU PROJET

La section internationale est constituée d'un tunnel bitube de deux fois 57,5 km. Ce tunnel pénètre sous terre à la hauteur de Saint-Jean-de-Maurienne pour déboucher, côté Italie, en

2- Vue générale de la liaison Lyon-Turin.

3- Profils en long comparés du tunnel de base et de la ligne historique.

2- General view of the Lyon-Turin link.

3- Comparative longitudinal profiles of the main tunnel and the historical line.

vallée de Suze. Après un court passage à l'air libre, les trains emprunteront un deuxième ouvrage, à Bussoleno, avant de rejoindre la plaine du Pô (figure 2). Ce tunnel est dit de base car, contrairement au tunnel ferroviaire du Fréjus creusé en 1880, il est situé à faible altitude et autorisera un profil en long ferroviaire compatible avec une exploitation à grande vitesse de la ligne car dépourvu de déclivité trop forte (figure 3).

LA GÉOLOGIE

Le tunnel de base franchit les Alpes d'ouest en est : sur ce tracé, 7 grandes zones géologiques ont été mises en évi-

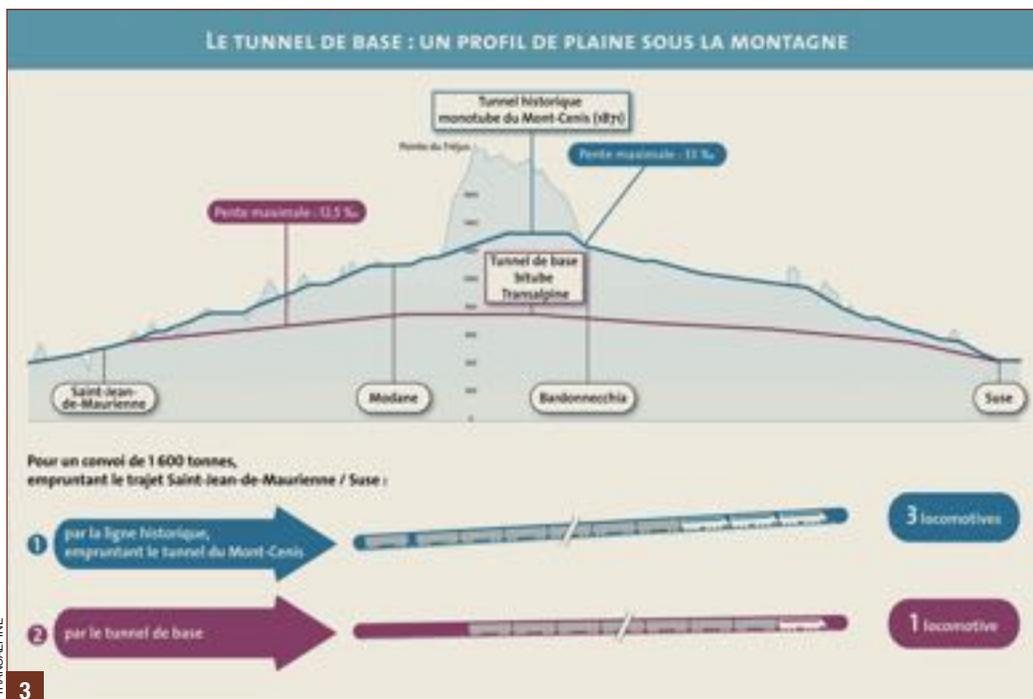
dence. Leurs limites ne sont évidemment pas strictes car elles résultent de multiples bouleversements géologiques (en 100 millions d'années, les phénomènes ont été nombreux et expliquent la géologie complexe des Alpes).

À l'intérieur d'une zone, il peut y avoir des secteurs plus réduits au sein desquels les enchevêtrements de roches peuvent être nombreux (figure 4) :

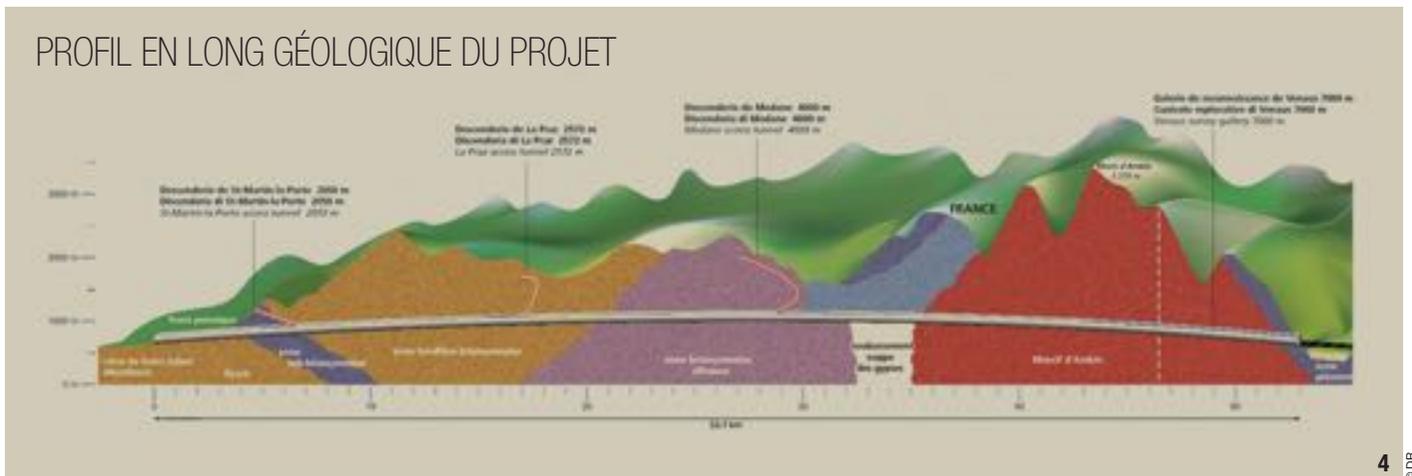
1- Une première zone, côté français, est constituée par « le domaine externe ». Il comporte à Saint-Julien-Mont-Denis un cône de déjection composé de matériaux meubles et très hétérogènes. Cela imposera des travaux de consolidation lors du premier creusement, qui sera effectué à la pelle mécanique.

2- La deuxième grande zone géologique est la zone sub-briançonnaise. Elle est constituée de grands plis avec principalement des roches carbonatées : calcaires, marnes et dolomies, se caractérisant par leur dureté. La présence éventuelle de poches d'eau générera des contraintes techniques d'évacuation d'eau.

3- Ensuite, la très vaste zone briançonnaise. Sur 13 km, la zone se divise en secteurs distincts. Toutefois, l'une de ses caractéristiques est que l'on y trouve du charbon, ce qui entraîne la présence éventuelle de grisou et donc des risques d'explosion si la ventilation n'est pas adaptée. Le grès, également très présent, est moins dur que dans la zone précédente mais plus abrasif. Sur cette partie du tracé, les équipes combineront les creusements à l'explosif et l'utilisation de tunneliers.



PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE DU PROJET



4 5

4- Le Briançonnais siliceux fait suite, sur 10 km environ. Ce secteur est constitué de 2 types de roches, les quartzites, roches dures et abrasives et les micaschistes, plus faciles à travailler. Ces 2 types de terrain sont parfois séparés par des failles contenant de l'eau. La combinaison « tunnelier » et « explosifs » sera encore nécessaire, jusqu'à la descenderie de Modane où le creusement vers l'est devrait s'effectuer uniquement avec un tunnelier jusqu'à Venas en Italie.

5- Ensuite débute au 30^e kilomètre du tracé une zone qui comporte une difficulté : le franchissement de l'Arc en profondeur dans le secteur d'Avrieux. Cette zone est caractérisée par la présence en surface de schistes lustrés, une couverture contrastant avec les roches rencontrées en profondeur : des roches dures comme les dolomies et les calcaires, alternant avec des roches plus tendres, les anhydrites.

6- Zone du Massif d'Ambin : C'est la zone la plus en profondeur, où les équipes se retrouveront parfois à 2 500 m sous la surface de la montagne, dans un environnement à la température extrêmement élevée pouvant atteindre 50°...

7- La zone piémontaise se situe sur la dernière partie du tunnel de base. Constituée de calschistes et de roches de mauvaise qualité, cette zone imposera un retour au creusement à l'explosif. C'est également ce type de géologie que l'on rencontrera au début du tunnel de Bussoleno côté italien.

entre 2003 et 2010. Ces descenderies avaient pour objectifs d'atteindre, depuis la surface, le tracé du tunnel de base au cœur du massif ; elles ont permis d'appréhender les conditions de creusement et de confronter plusieurs types de soutènements aux conditions in situ, notamment lors de la réalisation de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte. Elles ont toutes été creusées en méthode conventionnelle, majoritairement à l'aide d'explosifs à l'exception de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte qui traverse des roches plus tendres (schistes) et a été en partie creusée avec une pelle mécanique équipée de brise-roche. On a observé lors du creusement de cette dernière, des convergences radiales supérieures

4- Profil en long géologique du projet.

5- Convergences lors du creusement de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte (2005).

4- Geological longitudinal profile of the project.

5- Convergences during excavation of the Saint-Martin-la-Porte incline (2005).

au mètre dans la zone dite « sub-briançonnaise » imposant un avancement multi-phases avec alésages successifs et soutènements déformables (figure 5). Une galerie de reconnaissance de 7,5 km creusée au tunnelier roche dure côté italien complète ce dispositif afin de reconnaître le cœur du massif d'Ambin (figure 6).

Ces descenderies serviront de fenêtres d'accès à partir desquelles les travaux de creusement du tunnel de base seront entrepris. Elles seront ensuite utilisées, en phase d'exploitation, comme accès de service et permettront la ventilation de l'ouvrage.

La zone du houiller Briançonnais située entre les descenderies de Saint-Martin-la-Porte et La-Praz présente un risque



5 5

LES DESCENDERIES DE RECONNAISSANCE

Trois descenderies de reconnaissance ont été réalisées, côté France,

VUE D'ENSEMBLE DU BITUBE ET SES OUVRAGES ANNEXES



© DR 6

GALERIE DE RECONNAISSANCE

entre Saint-Martin-la-Porte et La-Praz - Zoom sur la zone du houiller



© DR 7

plus réduit de convergence nécessitant cependant d'être qualifié avant la réalisation du projet définitif. Le concepteur du projet a donc privilégié une approche visant à réduire le risque en réalisant une nouvelle galerie de reconnaissance entre Saint-Martin-la-Porte et La-Praz.

LA NOUVELLE GALERIE DE RECONNAISSANCE ENTRE LES DESCENDERIES DE SAINT MARTIN LA PORTE ET LA PRAZ

Le tracé du futur tunnel de base est confronté à 8 km à l'est de Saint-Jean-de-Maurienne à la zone sub-briançonnaise, zone où l'excavation au tunnelier est exclue en raison des convergences. Puis vient la zone dite du houiller briançonnais encore mal reconnue où des convergences décimétriques sont susceptibles de se produire et où le comportement du houiller peut être préju-

6- Vue d'ensemble du bitube et ses ouvrages annexes.

7- Galerie de reconnaissance entre Saint-Martin-la-Porte et La-Praz - zoom sur la zone du houiller.

6- General view of the double-tube and its accessory structures.

7- Reconnaissance gallery between Saint-Martin-la-Porte and La-Praz - close-up view of the Carboniferous zone.

diciable à la progression d'un tunnelier si certaines dispositions technologiques ne sont pas prises (figure 7).

Ce nouvel ouvrage de reconnaissance est décomposé en cinq zones (figure 8). La partie 1 comprend l'aménagement du pied de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte (2,3 km) déjà réalisée dans le cadre d'un marché précédent entre 2002 et 2009 et la réalisation de la chambre de montage du tunnelier. Cette chambre de montage a une section de 450 m². Elle mesure 45 m de long et 22 m de hauteur en voûte (figure 1).

Une rampe en matériaux de remblai a permis d'atteindre la voûte de la galerie existante puis de creuser la partie supérieure de la chambre.

L'excavation s'est ensuite déroulée par passes successives de hauteur variable jusqu'à atteindre le niveau du radier contre-voûté.

La partie 4 comprend l'aménagement du pied de la descenderie de La-Praz (longueur 2,5 km réalisée entre 2005 et 2009), et la création de la chambre de démontage du tunnelier de dimensions analogues à la chambre de montage. Cette partie est achevée.

La partie 3A prend naissance au PM 500 de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte. Elle longe le front du houiller sur 1,8 km jusqu'à atteindre le PM 10 du tunnel de base. Des sondages réalisés perpendiculairement à la partie 3A en direction du front du houiller permettent de contrôler le tracé de cette dernière de façon à ne pas intercepter prématurément la zone du front du houiller. Cette galerie a été creusée à l'explosif. Cette partie est achevée.

La partie 3B suit le tracé du tunnel de base depuis le PK 10 en direction du PK 11 et rejoint le pied de la descenderie (partie 1). Cette partie, sans doute la plus délicate du projet, sera réalisée en méthode conventionnelle.

Les équipes du chantier peuvent être confrontées à des convergences analogues à celles rencontrées lors de la réalisation de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte.

La partie 2, en cours de réalisation au moment où ces lignes sont écrites, est creusée au tunnelier. Elle traverse le houiller briançonnais dans l'axe et aux dimensions du tunnel de base. Elle mesure exactement 8 737 m de long. Le diamètre excavé est de 11,26 m et l'extrados de l'anneau mesure 10,80 m.

LE TUNNELIER

Le tunnelier est de type roche dure single shield de façon à être le plus compact possible (figure 9).

Le diamètre d'excavation du tunnelier est de 11,26 m. Il peut être porté à 11,46 m pour augmenter le vide annulaire compris entre l'extrados des voussoirs et le terrain excavé afin d'anticiper la convergence du terrain et limiter les frottements sur la jupe de la machine. Les voussoirs sont en béton armé de 45 cm d'épaisseur. La largeur relativement réduite des voussoirs, 1,50 m, permet de limiter à 10 m la longueur de la tête de la machine et réduire ainsi le risque de blocage de la tête. La compacité de la tête du tunnelier, sa conicité accentuée et le jeu de surcoupes disponibles sont un gage d'efficacité dans des terrains convergents.

La roue de coupe est dotée de 75 molettes de 19 pouces et est motorisée par 14 moteurs électriques de 350 kW. Le couple nominal est de 8 888 kNm et le couple de déblocage de la roue atteint 35 000 kNm. La roue tourne à 5 tours/minute.

La poussée nominale des vérins est de 12 380 t, jusqu'à 18 570 t pour déblocage de la tête.

Le tunnelier est équipé de deux sondeuses longitudinales permettant des reconnaissances à l'avancement jusqu'à 200 m devant le bouclier ; un bras érecteur de cintre permet de poser des cintres HEB 240 en intrados des voussoirs en cas de sollicitations du terrain dépassant la résistance de ces derniers. Deux foreuses radiales complètent cet équipement et sont susceptibles de mettre en place des boulons d'ancrage de 15 m de long au travers des voussoirs déjà posés.

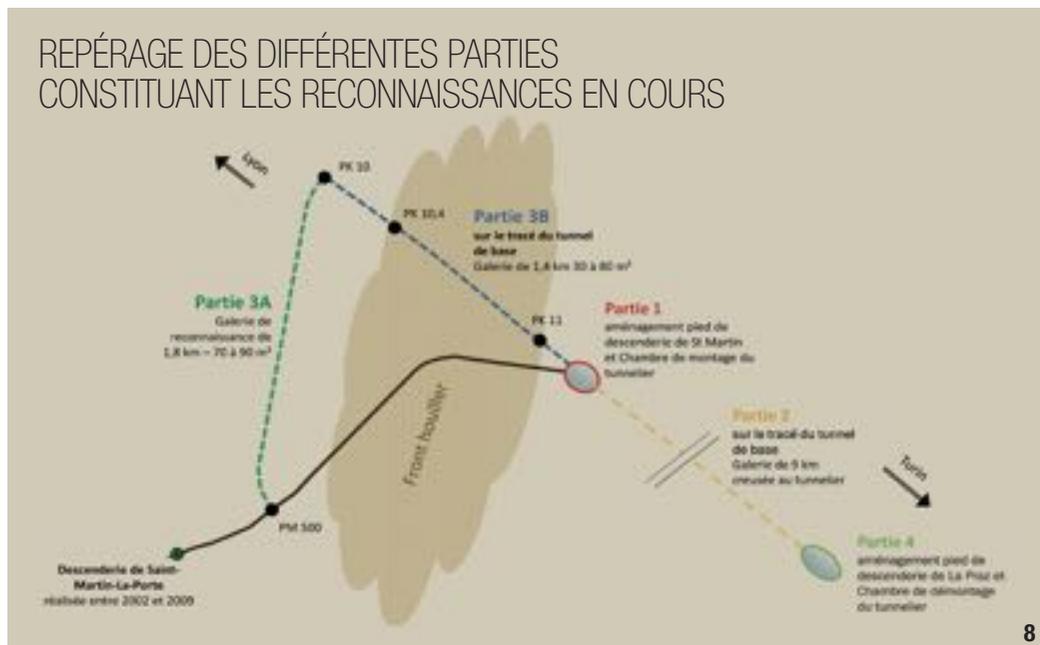
Enfin un ensemble de 7 fontimètres permet de suivre l'évolution des mouvements du terrain en extrados du bouclier.

L'ensemble du tunnelier, tête et train suiveur mesure plus de 135 m de long. L'évacuation du marinage se fait par tapis. Les voussoirs sont approvisionnés par train sur pneus à guidage optique. Le mortier bi-composant est fabriqué à l'extérieur puis pompé jusqu'au tunnelier où les deux composants sont mélangés avant injection au travers de tubulure situées dans l'épaisseur (70 mm) de la jupe.

LES VOUSSOIRS

Les anneaux sont composés de 7 voussoirs plus une clé. Ils sont universels avec un pincement de 40 mm pour un diamètre d'extrados de 10,80 m.

REPÉRAGE DES DIFFÉRENTES PARTIES CONSTITUANT LES RECONNAISSANCES EN COURS



Un voussoir de radier est posé à l'avancement. Le back-up roule ainsi sur un radier plat et la logistique en arrière du tunnelier en est facilitée (figure 10). Deux types de béton, C45/55 et C80/95 combiné à différents types de ferrailage offrent un choix de 3 types de voussoirs à mettre en œuvre en fonction des sollicitations attendues du terrain. Le groupement adjudicataire des travaux a choisi de fabriquer ses voussoirs en propre. La fabrication du béton est sous-traitée mais la centrale est adjacente à l'usine de préfabrication. L'usine de préfabrication située à proximité immédiate du chantier a été mon-

8- Repérage des différentes parties constituant les reconnaissances en cours.
9- Le tunnelier dans l'atelier du Creusot.

8- Identification of the various parts on which reconnaissance work is in progress.
9- The TBM in the workshop at Le-Creusot.

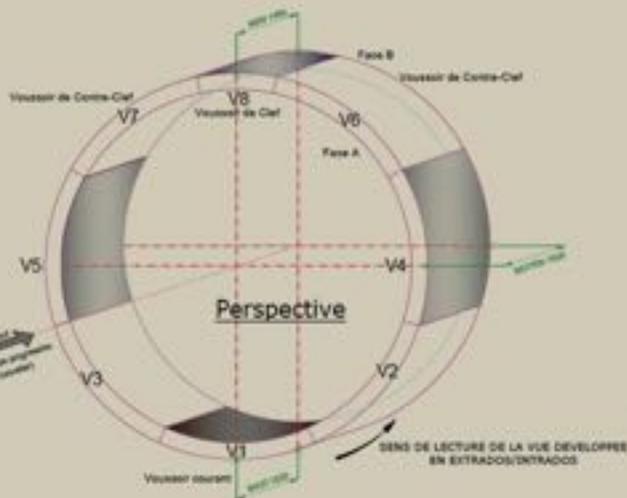
tée avec une capacité de production de 90 voussoirs par jour. Elle tourne sur deux postes, cinq jours par semaine. Cette usine a permis l'embauche de 90 personnes dont une majorité localement.

L'ÉVACUATION DES DÉBLAIS

Le marinage est évacué vers l'extérieur à l'aide d'un tapis d'une capacité de 800 t/heure. Ce tapis alimente directement une zone de dépôt située à 2,2 km de la sortie du tunnel. Les déblais sont triés à l'arrivée du tapis en fonction de la qualité des matériaux avec un système de détection par



ANNEAU COMPOSÉ DE 7+1 VOUSOIRS



© DR

colorimétrie. Le système de détection par analyse chimique équipé d'une source de rayonnement gamma, bien que meilleur techniquement, a été abandonné en raison des difficultés rencontrées pour avoir une autorisation d'exploitation auprès de l'IRSN.

Quatre sites de stockage mis à disposition par le maître d'ouvrage permettent de stocker les matériaux en fonction de leurs réemplois éventuels ou non. Ces sites ont été l'objet d'un traitement attentif en matière de protection de la faune et de la flore, clôtures antibatrâciens, recensement des espèces, pêches électriques...

CONCLUSION

Chacun des thèmes abordés dans cette présentation devrait lui-même être l'objet d'un développement plus complet tant ce chantier est novateur dans beaucoup de domaines.

10- Anneau composé de 7+1 voussoirs.
11- Installations de chantier à Saint-Martin-la-Porte.

10- Ring formed of 7+1 segments.
11- Site facilities at Saint-Martin-la-Porte.

L'importance des moyens, la polyvalence des techniques utilisées et l'organisation du chantier traduisent l'engagement de tous les intervenants à la réussite du projet et la volonté de terminer ce tunnel qui fait déjà référence dans l'histoire des ouvrages souterrains. □

1- Loi n°2016-1917 du 29 décembre 2016 de finances pour 2017.

PRINCIPALES QUANTITÉS

450 personnes en pic

1,8 millions d'heures de travail

700 t d'explosifs

137 000 m³ de béton

130 000 m³ de béton de voussoirs

5 825 anneaux de 1,5 m, épaisseur 45 cm

238 000 000 kWh

DURÉE DES TRAVAUX : 8 ans

VOLUME DES DÉBLAIS : 1,3 millions de m³

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : TELT

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Egis tunnel / Alpina

COORDONNATEUR SPS : Bureau Veritas

GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Spie Batignolles, Eiffage GC, Cmc, Ghella, Cogeis, Sotrabas

FABRICANT DU TUNNELIER : Nfm

ABSTRACT

LYON-TURIN TUNNEL RECONNAISSANCE GALLERY, BETWEEN THE SAINT-MARTIN-LA-PORTE AND LA-PAZ INCLINES

LOÏC THÉVENOT, EIFFAGE GC

After describing the context of the Lyon-Turin rail link project between France and Italy, the article describes the nature of the reconnaissance work prior to construction of the future 2x57.5km double-tube tunnel. The reconnaissance gallery between the Saint-Martin-la-Porte and La-Praz inclines passes through Sub-Briançonnais Carboniferous ground where major convergences are expected. This zone is excavated by the conventional method. Then comes the Briançonnais Carboniferous zone which is excavated with a hard-rock type TBM over 9 km. This reconnaissance will make it possible to choose the techniques that will be used for final tunnel driving. □

GALERÍA DE RECONOCIMIENTO DEL LYÓN-TURÍN, ENTRE LAS GALERÍAS DESCENDIENTES DE SAINT-MARTIN-LA-PORTE Y LA-PAZ

LOÏC THÉVENOT, EIFFAGE GC

Tras poner en contexto el proyecto de enlace ferroviario Lyon-Turin entre Francia e Italia, el artículo describe la naturaleza de los trabajos de reconocimiento previos a la construcción del futuro túnel bitubo de 2x57,5 km. La galería de reconocimiento entre las galerías descendientes de Saint-Martin-la-Porte y La-Praz atraviesa los terrenos carboníferos de la región de Briançon, donde se prevén importantes convergencias. Esta zona se excava utilizando el método tradicional. A continuación viene la zona carbonífera de Briançon, que se excava con una tuneladora de tipo roca dura a lo largo de 9 km. Estos reconocimientos permitirán elegir las técnicas que se emplearán para la perforación final del túnel. □



© PHOTOTHÈQUE ISC

LA STATION MAIRIE-D'AUBERVILLIERS, LABORATOIRE D'INNOVATIONS

AUTEURS : SÉBASTIEN GARNIER, RESPONSABLE DE PÔLE, ISC - LAURENT CAYET, DIRECTEUR D'ACTIVITÉS, CHANTIERS MODERNES CONSTRUCTION - FRANÇOIS COLLETTA, DIRECTEUR DE TRAVAUX, SOGEA TPI

SI, DE PRIME ABORD, LA STATION MAIRIE-D'AUBERVILLIERS, SITUÉE SUR LE PROLONGEMENT DE LA LIGNE 12 DU MÉTRO PARISIEN, SEMBLE CLASSIQUE AVEC SA FORME RECTANGULAIRE ET SA PROFONDEUR STANDARD, SA RÉALISATION RECÈLE DE NOMBREUSES DIFFICULTÉS TECHNIQUES. A COMMENCER PAR LE FAIT QU'ELLE EST CONSTRUITE AUTOUR D'UN TUNNEL EXISTANT, CE QUE LE GROUPEMENT VINCI CONSTRUCTION A SAISI COMME UNE OPPORTUNITÉ POUR DÉVELOPPER ET METTRE EN ŒUVRE DES SOLUTIONS INNOVANTES POUR LA RÉALISATION DES TRAVAUX.

PRÉSENTATION DU PROJET

À partir du terminus historique de la Porte-de-la-Chapelle, le projet de prolongement de la ligne 12 du métro parisien a pour objectif d'irriguer des secteurs en cours de transformation urbaine (plaine Saint-Denis, pont de Stains), pour aller jusqu'au cœur de la ville d'Aubervilliers, participant au désenclavement de cette commune.

Une première phase de travaux de 2008 à 2012 a permis la réalisation de l'intégralité du tunnel (4,2 km) et d'une première station, Front-Populaire, nouveau terminus de la ligne depuis sa mise en service en décembre 2012. La seconde phase du projet prévoit la réalisation des stations Aimé-Césaire et Mairie-d'Aubervilliers, cette dernière devenant le nouveau terminus.

1- Vue de la centrale à béton sur le quai du canal Saint-Denis.

1- View of the concrete mixing plant on the quay of Canal Saint-Denis.

CONTEXTE

Les travaux se déroulent dans une zone urbaine dense. Les emprises de chantier amputent grandement les voies de circulation existantes (notamment l'avenue Victor-Hugo, qui relie le pont de Stains à la mairie d'Aubervilliers), connues pour leur important trafic. L'enjeu de l'impact des travaux sur le trafic routier a été identifié en



© PHOTOTHÈQUE VCF TP-IDF

2

amont par la maîtrise d'ouvrage, qui a décidé de l'intégrer dans l'appel d'offre à travers les deux dispositions suivantes :

- Une réalisation de la station Mairie-d'Aubervilliers en taube, avec un phasage très contraint pour les travaux de la dalle de couverture ;
- Une obligation d'évacuer les déblais via le tunnel existant, qui donne un accès direct de la station Mairie-d'Aubervilliers jusqu'au canal Saint-Denis où un transport par voie fluviale est possible.

2- Détail sur les tapis convoyeurs sur la zone d'installation.

3- Schéma de principe des conduites en tunnel.

2- Details of conveyor belts in the installation area.

3- Schematic diagram of pipes in the tunnel.

INSTALLATIONS DE CHANTIER

Le groupement d'entreprises de Vinci Construction (Chantiers Modernes Construction, TPI, Botte Fondations, Dodin Campenon Bernard), qui avaient déjà participé à la 1^{er} phase des travaux, est allé au-delà du respect de ces dispositions, en proposant, dès la réponse à l'appel d'offres, le transport du béton et des boues de forage de paroi moulée via le tunnel existant. Le groupement a proposé de coupler ce dispositif à l'installation d'une centrale de traitement des boues et d'une

centrale à béton sur le quai du canal Saint-Denis (figure 1).

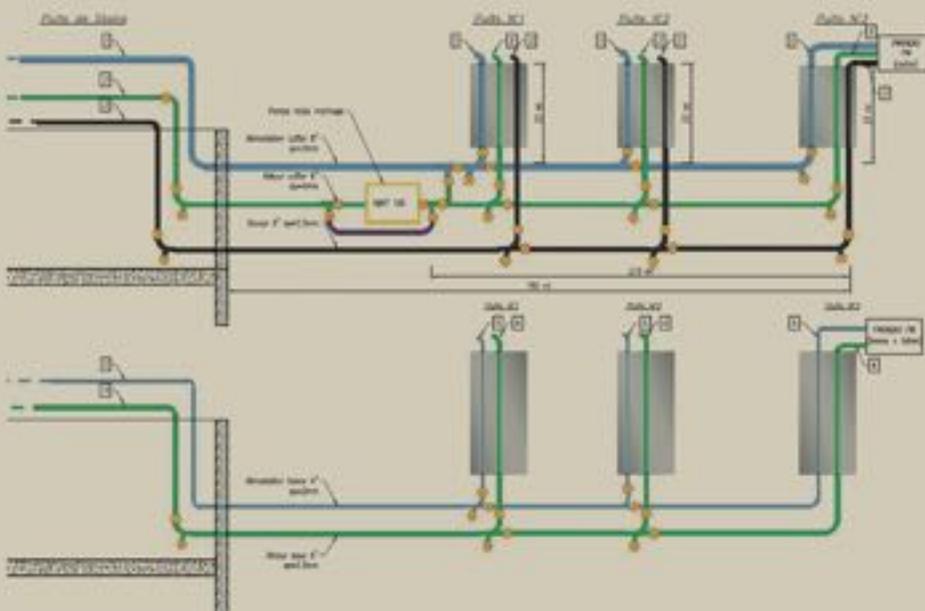
En plus de réduire l'impact du chantier sur la circulation routière en surface et d'améliorer son bilan carbone, cela permet de mieux maîtriser les risques du projet. En effet, le chantier possède sa propre logistique d'approvisionnement, dont il est maître, ce qui le rend autonome vis-à-vis des contraintes extérieures. Ainsi sont rendus possibles les bétonnages en dehors des heures d'ouverture des centrales à béton prêt à l'emploi. La centrale à béton du chantier a, en outre, été dimensionnée pour garantir les volumes de bétonnage prévus par le programme des travaux, ce que ne permettaient pas les centrales de la zone.

Les voies navigables du canal Saint-Denis sont utilisées au maximum pour l'approvisionnement du chantier et l'évacuation des matériaux, en privilégiant autant que possible le recours au double flux qui permet de réduire l'impact environnemental (figure 2). Ces principes conduisent à pomper la quasi-totalité du volume de béton vers les deux stations depuis la centrale à béton située sur le quai du canal Saint Denis.

La formulation des bétons a été adaptée pour assurer de la pompabilité des bétons utilisés. Des essais de pompabilité ont été réalisés pour valider ces formulations.

Le système de pompage stationnaire est constitué de deux lignes indépendantes, situés à l'aplomb de chacun des malaxeurs de la centrale de production et comprend les des éléments suivants :

SCHÉMA DE PRINCIPE DES CONDUITES EN TUNNEL



© PHOTOTHÈQUE ISC

3



4

© PHOTOTHÈQUE VCF TP IDF

→ **Pompe thermique ou électrique** : débit d'environ 60 m³/h chacune.

→ **Trémie agitatrice** : avec une capacité de 6 m³, elle permet d'assurer un débit de béton continu, tout en gardant les propriétés du béton frais par agitation.

→ **Aiguillage** : permettant de shunter une partie du circuit en cas de problèmes en cours de bétonnage, il distribue le pompage du béton depuis une même pompe vers deux (ou trois) conduites différentes.

→ **Tuyauterie** : conduites en acier de 125 mm de diamètre.

→ **Dispositif de nettoyage** : le réseau est lavé à la fin de chaque bétonnage par pompage d'eau. Cette eau est totalement récupérée au niveau de la centrale à béton, stockée puis réutilisée lors de productions de béton suivantes.

→ **Mât de bétonnage** : déployable aussi en sous-œuvre, il permet de distribuer le béton en hauteur pour le bétonnage des structures verticales.

Leur disposition variera en fonction des phases de bétonnage. Compte tenu de la longue distance de pompage pour atteindre la station Mairie-d'Auberwilliers (environ 800 m), des pompes de relais sont nécessaires dans un point intermédiaire du tunnel (autour de 500 m) pour assurer un débit de béton de 60 m³/h en bout de ligne (figure 3).

PUITS DE CONNEXION

Pour raccorder le tunnel à la surface au droit de la station Mairie-d'Auberwilliers, la solution technique retenue

par le groupement consistait à forer trois puits de 2 m de diamètre. Un des puits est désaxé par rapport à l'axe du tunnel, tandis que les deux autres sont centrés sur le tunnel.

La réalisation de ces puits présente un risque majeur de fragilisation de la structure en place du tunnel. Afin de maîtriser ce risque, un modèle de calculs a été élaboré par Isc pour refléter le fonctionnement structurel des anneaux de voussoirs du tunnel existant, et obtenir la modification de

4- **Vue des conduites et des puits de connexion.**

5- **Plan des conduites et des puits de connexion.**

4- **View of the pipes and connecting shafts.**

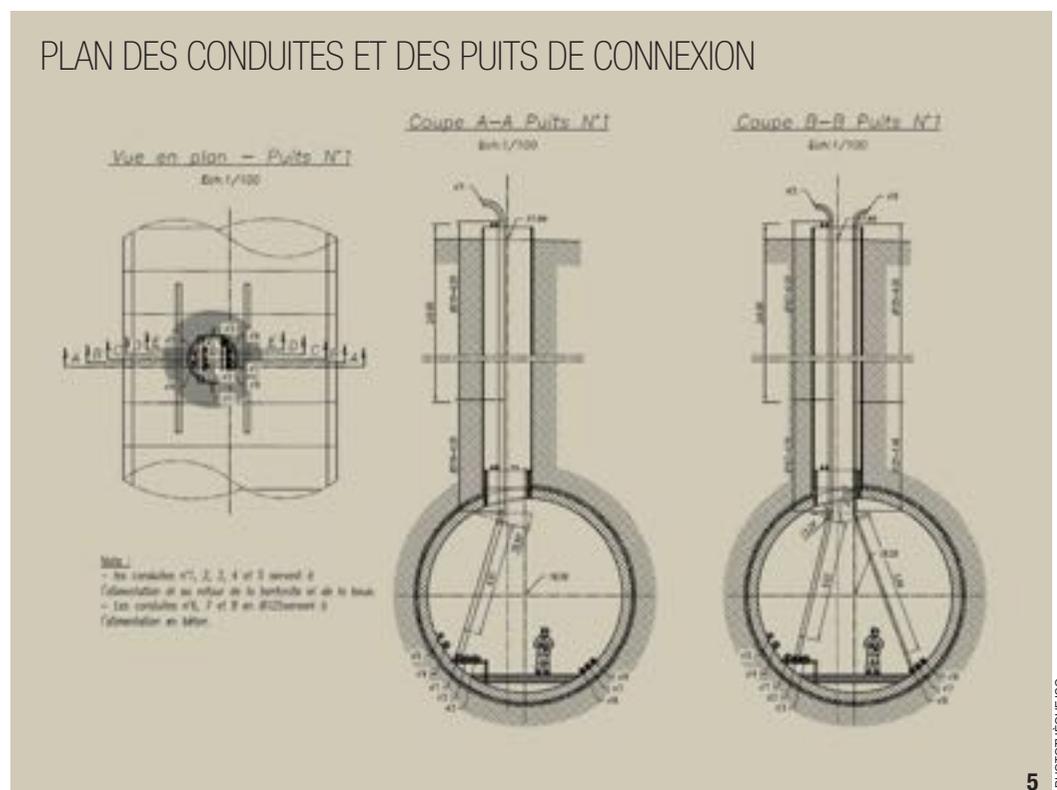
5- **Drawing of the pipes and connecting shafts.**

l'état de contraintes du tunnel autour des puits.

Les anneaux du tunnel ont un diamètre intérieur de 8,00 m, et une épaisseur de 40 cm de béton armé.

Compte tenu de la dimension des puits (diamètre 2 m) et de la longueur des anneaux du tunnel (1,80 m), les puits ont été disposés à cheval sur 2 anneaux. La redistribution des efforts ainsi obtenue dans le tunnel permet de réduire le confortement métallique provisoire.

PLAN DES CONDUITES ET DES Puits DE CONNEXION



5

© PHOTOTHÈQUE ISC



6



7

© PHOTOTHÈQUE VCF TP IDF

© PHOTOTHÈQUE VCF TP IDF

La méthode retenue pour la réalisation de ces puits consiste en la réalisation d'un forage de 2 m de diamètre comprenant le fonçage d'un tube métallique à l'avancement. Ce forage est descendu quelques dizaines de centimètre au-dessus de la génératrice supérieure du tunnel, dans les Calcaires de Ducy préalablement injectés.

6 & 7- Vue de la réalisation de la dalle de couverture.

6 & 7- View of execution of the cover slab.

Après s'être assuré de la relative étanchéité du fond de forage, les voussoirs sont carottés de façon à obtenir une découpe à l'aplomb du tubage métallique.

Une fois l'ouverture réalisée, un chemisage de plus faible diamètre est mis en place, fixé à l'intrados des voussoirs. L'espace annulaire entre ces tubes

métalliques est finalement scellé par un microbéton assurant l'étanchéité définitive.

Ces puits de connexion peuvent alors recevoir leurs équipements, assurant le raccordement des installations localisées sur le quai du canal à la zone de production située en surface sur l'avenue Victor-Hugo. Voici les équipements mis en place au démarrage des travaux de paroi moulée (figures 4 et 5) :

- 5 conduites pour l'alimentation et le retour de la boue bentonitique ;
- 3 conduites pour l'alimentation en béton.

DALLE DE COUVERTURE

Les caractéristiques de la station Mairie-d'Aubervilliers sont approximativement les suivantes : longueur de 220 m, largeur variable entre 18 et 21 m sur une profondeur de 26 m et comportant 4 niveaux. La hauteur de la charge d'eau est d'environ 22 m. Le génie civil de la station est réalisé suivant un phasage des circulations routières et piétonnes qui tient compte des contraintes d'accès et du contexte environnemental, principalement le maintien en tout instant des entrées et sorties des commerces et des habitations des riverains.



8 © PHOTO THÉQUE VCF TP IDF

Pour ce faire, la dalle de couverture de la station (d'une épaisseur variant entre 1,50 m et 2 m, à 4 m environ sous la surface) a été réalisée dans le respect de ces contraintes permettant le maintien permanent de la circulation routière.

Compte tenu de l'implantation de la station en plein milieu de l'avenue Victor-Hugo, quasiment sur toute sa largeur, la station est réalisée en 9 phases :

- Les 4 premières phases concernent la réalisation des murettes-guides, des parois moulées et des puits de connexion, avec des basculements de chaussée successifs pour maintenir en permanence la circulation sur l'avenue Victor Hugo. Sont également mis en place les profilés de la future berlinoise longitudinale ;
- Les 2 phases suivantes concernent la réalisation de la dalle de couverture, tout d'abord côté Ouest, sur les 2/3 de sa largeur, avec une excavation à ciel ouvert, puis, après remblaiement et basculement de la chaussée sur la dalle exécutée, réalisation du 1/3 restant de dalle côté Est (figures 6 et 7) ;
- Les 3 dernières phases concernent la réalisation des structures internes et la fermeture des trémies en surface.

CONGÉLATION DES TYMPANS

Des parois moulées sont mises en œuvre sur l'intégralité du périmètre de la station Mairie-d'Aubervilliers,

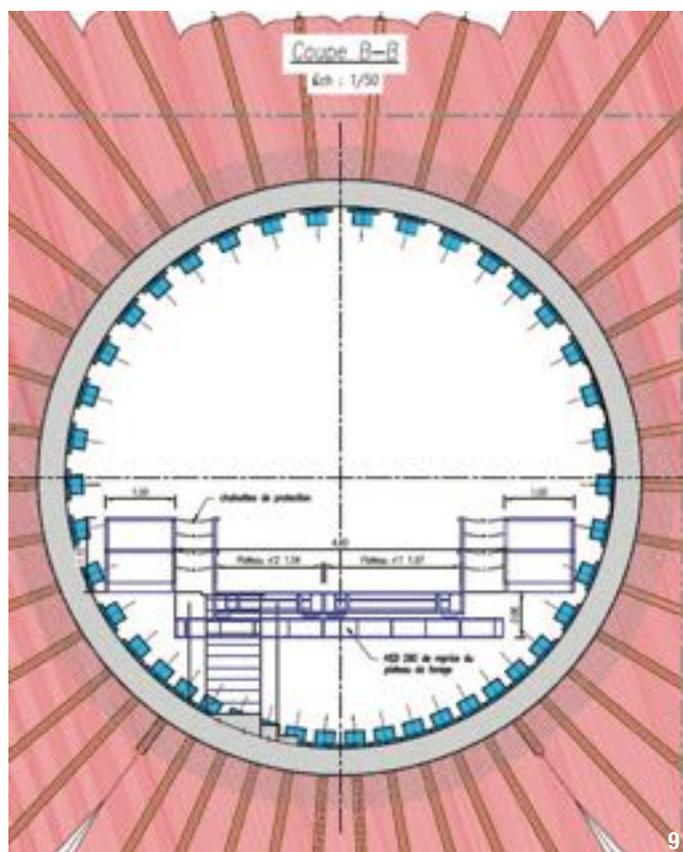
à l'exception des « tympans », c'est-à-dire les zones d'intersection avec le tunnel existant. Sur les tympans, les parois moulées sont réalisées de part et d'autre du tunnel existant, au plus proche, et également au-dessus du tunnel.

Lors de l'excavation de la station, on sera ainsi confronté à des zones de terrain naturel non soutenu par des parois moulées, autour du tunnel et sous le tunnel. Un soutènement doit être mis en place pour reprendre les poussées de terre.

Les horizons géologiques rencontrés au droit de ces tympans sont composés de sables de Beauchamp traités par jet grouting.

Les analyses de risque menées conjointement entre les services de la RATP et le groupement ainsi que les investigations menées sur le chantier au démarrage des travaux n'ont pas permis d'écarter la probabilité de venues d'eau importantes dans la couche de sables de Beauchamp, dont la criticité reste trop élevée.

La volonté de maîtriser les risques du projet a conduit le groupement et le maître d'œuvre à proposer différentes solutions de traitement provisoire des tympans. Après plusieurs mois d'échanges et d'études de faisabilité, c'est la solution de traitement des terrains par congélation qui a été retenue.



9 © PHOTO THÉQUE ISC

8- Vue de la réalisation des tirs de congélation.

9- Plan tirs de congélation et de la plateforme de travail.

8- View of ground-freezing holes execution.
9- Layout of ground-freezing holes and the work platform.

Il s'agit de réaliser des forages depuis le tunnel existant. Au droit de chaque tympan, 2 lignes de 40 forages chacune sont réalisées (figures 8 et 9). Les forages d'une même ligne sont espacés de 63 cm et réalisés à 360°, pour un linéaire total de 300 m de forage environ. Les forages sont ensuite équipés de tubes congélateurs, dans

10- Vue des cintres de confortement du tunnel.

10- View of tunnel reinforcement centring.



© PHOTOTHÈQUE ISC
10

lesquels on fait circuler un fluide réfrigérant reliés à 2 groupes de froid. On constitue ainsi un mur de terrain congelé d'environ 1,3 m d'épaisseur. Ce tympan provisoire, complètement étanche, permettra de réaliser les travaux d'excavation de la station en toute sécurité.

en place des cintres a fait l'objet d'une étude de méthodes spécifique, réalisée par Isc, pour s'adapter aux conditions d'exécution spécifiques de ces travaux. Les travaux de mise en place des cintres ont débuté en novembre 2016 et se poursuivront jusqu'au début 2017 (figure 10).

CINTRAGE DES ANNEAUX DU TUNNEL

Lors des travaux de terrassement en taupe de la station, la couverture de terre au-dessus du tunnel existant va peu à peu être réduite. La solution étudiée par le groupement pour assurer la stabilité des voussoirs du tunnel lors des travaux d'excavation de la station et du démontage du tunnel consiste à installer des cintres métalliques sur les anneaux concernés. Les études de structure des cintres métalliques provisoires ont été menées conjointement par la Dits et Isc. La mise

LA SUITE DES TRAVAUX

Tous ces challenges techniques ont été relevés avec succès jusqu'à ce jour, permettant d'envisager la mise en froid des tympan et le début de l'excavation en taupe sous la dalle de couverture pour le début 2017. Il reste maintenant à l'équipe du chantier d'autres défis, notamment la déconstruction des anneaux du tunnel en parallèle de l'excavation de la station, et la réalisation des voiles tympan définitifs, coffrés sur une face. Autant de nouvelles prouesses techniques pour mener à terme ce chantier unique. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

STATION MAIRIE D'AUBERVILLIERS

VOLUME DES TERRES À EXCAVER : 140 000 m³

VOLUME DE BÉTON DES STRUCTURES INTERNES : 81 000 m³

DISTANCE ENTRE LA STATION MAIRIE-D'AUBERVILLIERS ET LA CENTRALE À BÉTON : 1 000 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : RATP

MAÎTRE D'ŒUVRE : Systra

ENTREPRISES : groupement Chantiers Modernes Construction (mandataire), Dodin Campenon Bernard, Botte Fondations, Sogea Tpi

BUREAU D'ÉTUDES STATION MAIRIE D'AUBERVILLIERS : Isc

ABSTRACT

MAIRIE-D'AUBERVILLIERS STATION, A LABORATORY FOR INNOVATION

SÉBASTIEN GARNIER, ISC - LAURENT CAYET, CHANTIERS MODERNES CONSTRUCTION - FRANÇOIS COLLETTA, SOGEA TPI

A special feature of Mairie-d'Aubervilliers Station, on the extension of Paris Metro Line 12, is that it was built after its access tunnel, constructed during a previous work phase. This feature allowed the Vinci Construction consortium to put in place a system for pumping concrete and drilling mud from plants located at the end of the tunnel. Three connecting shafts link the tunnel to the surface. Other consequences of this specific feature: the waterproofing system at the tunnel/station interface requires ground freezing treatment, applied from inside the tunnel. The tunnel must be reinforced with provisional steel centring during the station earthworks. □

LA ESTACIÓN MAIRIE-D'AUBERVILLIERS, LABORATORIO DE INNOVACIONES

SÉBASTIEN GARNIER, ISC - LAURENT CAYET, CHANTIERS MODERNES CONSTRUCTION - FRANÇOIS COLLETTA, SOGEA TPI

La estación Mairie-d'Aubervilliers, en la prolongación de la Línea 12 del metro de París, presenta la particularidad de estar construida después del túnel que da acceso a ella, realizado durante una fase anterior a las obras. Esta particularidad ha permitido al consorcio de empresas Vinci Construction utilizar un dispositivo de bombeo del hormigón y los lodos de perforación desde las centrales situadas en el extremo del túnel. Tres pozos de conexión enlazan el túnel con la superficie. Otras consecuencias de esta especificidad: la estanqueidad de la interfaz túnel/estación requiere un tratamiento del terreno por congelación, realizado desde el interior del túnel. Asimismo, el túnel debe estabilizarse mediante cimbras metálicas provisionales durante las obras de movimiento de tierras de la estación. □

PREMIER PARKING MUTUALISÉ DANS LE QUARTIER DE LYON CONFLUENCE

AUTEURS : MATHIEU AVRIL, CHEF DE PROJET GÉOTECHNIQUE ET OUVRAGES SOUTERRAINS, ARCADIS - ROLAND PARROT, MANAGER DE PROJET BÂTIMENT ET GÉNIE CIVIL, ARCADIS

LE DÉVELOPPEMENT DU QUARTIER DE LA CONFLUENCE À LYON S'ACCOMPAGNE NOTAMMENT D'UNE RÉFLEXION SUR LE STATIONNEMENT. C'EST POURQUOI LA SPL LYON CONFLUENCE, AMÉNAGEUR DU QUARTIER, A CHOISI DE RÉALISER 2 PARKINGS MUTUALISÉS ET ENTERRÉS. LE PREMIER D'ENTRE EUX DOIT ÊTRE MIS EN SERVICE DÉBUT 2018. LE RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES DIFFÉRENTS PARKINGS LYONNAIS ET LES ALÉAS QUI ONT PARFOIS ÉTÉ RENCONTRÉS ONT CONDUIT À METTRE EN PLACE UNE PROCÉDURE DE GESTION DES RISQUES PEU HABITUELLE POUR CE GENRE D'OUVRAGE.



1
© TOMASINI DESIGN

CONTEXTE

Depuis les années 2000, le quartier de la Confluence à Lyon se développe de manière très importante : prolongement du tramway, nombreux bâtiments de logements et de bureaux avec notamment le siège d'Eiffage, la darse, le Pôle de Commerces et de Loisirs, le Musée des Confluences, le siège de la Région.

Et ces aménagements ne sont pas terminés.

En 1999, la Métropole de Lyon a confié à la SPL (Société Publique Locale) Lyon Confluence ce projet urbain en tant qu'aménageur.

Afin d'accompagner ce développement, il convenait de résoudre la problématique de stationnement lié aux besoins

1- Vue d'un niveau du parking.

1- View of a car park level.

des futurs résidents, des salariés du nouveau quartier et des visiteurs d'événements (centre commercial, expositions, etc.).

Pour répondre à cet enjeu, la SPL Lyon Confluence a fait le choix de construire 2 parkings mutualisés et enterrés.

Le premier de ces parkings, objet de cet article, est situé sur l'îlot A1, sur

PLAN DE SITUATION



© ARCADIS

2

le site de l'ancien marché de gros, le long du quai Perrache (figure 2), afin de limiter la circulation au cœur du quartier. Il est actuellement en construction et offrira 814 places de stationnement sur 5 niveaux de sous-sol. Au-dessus de ce parking seront construits 4 bâtiments comprenant logements, bureaux, commerces. Par ailleurs, la SPL Lyon Confluence a ajouté des services de proximité à ce parking.

L'exploitant provisoire en sera la SPL Lyon Confluence. Le parking sera ensuite remis à la collectivité qui mettra en place une DSP (délégation de service public).

Le deuxième parking sera réalisé ultérieurement plus au sud, toujours en bordure du quai Perrache (îlot D1).

CONCEPTION

L'équipe de maîtrise d'œuvre du premier parking mutualisé a été désignée en janvier 2013. Elle est composée de :

2- Plan de situation.

2- Location map.

- Arcadis, maître d'œuvre mandataire du groupement, Bureau d'études structure, géotechnique, OPC ;
- Agence Carbonnet, Architecte ; Tomasini Design, Architecte ;
- Cap Ingelec, Bureau d'études Fluides.

Les études ont commencé début 2013 avec l'APS puis l'APD et la préparation du dossier de permis de construire en fin d'année, pour dépôt début 2014. La phase PRO a été ensuite réalisée au premier semestre 2014 puis reprise au second semestre pour supprimer un niveau de sous-sol (6 niveaux étaient envisagés au début).

Ce parking sur cinq niveaux enterrés présente une emprise au sol d'environ 5 200 m² (90 m de longueur sur 64 m de largeur). La forme du parking est présentée sur la figure 3.

Les entrées/sorties des véhicules se feront par des trémies sur le quai Perrache, alors que les accès piétons seront situés sur le prolongement de la rue Delandine, au plus près des lieux de destination des usagers, comme représenté sur la figure 4. L'accueil du parking sera situé au niveau rez-de-chaussée (figure 5).

Partie intégrante du futur îlot A1, ce parking souterrain sera surplombé par des immeubles de la ZAC (figures 4 à 6, uniquement indicatives afin de situer le parking dans un environnement projeté dans lequel certaines évolutions majeures sont déjà intervenues depuis la production de ces vues).

Au stade des études, le promoteur n'étant pas encore désigné, des

hypothèses ont été retenues. Mais ce programme n'est pas figé ; il fixe seulement les limites pour le promoteur. Actuellement, des évolutions sont en cours, en relation avec le promoteur désigné (Linkcity, filiale de promotion immobilière de Bouygues Construction). La SPL Lyon Confluence a voulu un ouvrage de qualité ainsi qu'une ambiance confortable et sécurisante et de grandes fonctionnalités pour les usagers. Les figures 1, 7 et 8 présentent des vues architecturales du parking, avec notamment les poteaux architectoniques.

La géologie reconnue au droit du parking est constituée, de haut en bas, par des remblais en surface, puis des alluvions du Rhône et enfin de la formation du Jardin des Plantes.

La nappe est située à quelques mètres de profondeur. Compte tenu de cela et du peu d'avoisinants et de contraintes ainsi que de la grande largeur de la fouille, la conception s'est rapidement orientée vers une enceinte en parois moulées avec tirants précontraints provisoires et planchers butonnants en phase définitive (figure 9).

Le maître d'ouvrage a été séduit par la possibilité de retenir des tirants pour les phases provisoires plutôt que, comme sur la plupart des parkings lyonnais en contexte urbain, des systèmes butonnants qui rendent nécessaires la présence sur les niveaux de barrettes massives. Cela allait dans le sens de la qualité qu'il recherchait pour l'ouvrage : une grande transparence des plateaux, des espaces plus clairs et dégagés, et donc plus sécurisants. Cette technique a permis par ailleurs d'améliorer encore la qualité esthétique par le soin apporté dans la conception architectonique des poteaux.

Concernant la nappe, l'excavation de la fouille nécessite un rabattement à l'intérieur de l'enceinte étanche formée par les parois moulées. En phase définitive, il est prévu un radier drainant à la base du dernier niveau de sous-sol et un pompage permanent, technique habituelle sur les parkings lyonnais. Les parois moulées de 82 cm d'épaisseur sont ancrées dans une couche de sol peu perméable assez profondément pour que les débits de pompage soient admissibles et les stabilités hydrauliques vérifiées (figure 9). Ainsi les parois moulées font 37 m de profondeur pour une fouille de 17 m soit une fiche de 20 m pour un débit de pompage estimé en conception de l'ordre de 10 (sans aléas) à 50 m³/h (avec quelques aléas). ▷

Le parking est fondé sur les parois moulées en périphérie et sur des semelles superficielles en fond de fouille à l'intérieur du parking.

ANALYSE DE RISQUES

De nombreux parkings enterrés ont été construits dans Lyon avec des méthodes de construction comparables à celles retenues dans le cadre de ce projet : parois moulées ancrées dans une couche de sol peu perméable, pompage en phase provisoire, radier drainant définitif.

Certains de ces parkings ont rencontré des problèmes lors de leur réalisation et/ou de leur exploitation.

Prenant en compte ce retour d'expérience et répondant en cela aux attentes du maître d'ouvrage, Arcadis

a proposé une analyse de risques, procédure courante en travaux souterrains mais peu habituelle pour ce genre d'ouvrage. Arcadis l'a menée au stade de la conception afin d'identifier les aléas possibles et leurs conséquences, de proposer des mesures pour réduire ces risques et afin de les contractualiser par la suite dans le marché travaux.

Les principaux risques identifiés pour ce parking ont été les suivants :

→ Débit de pompage plus important que prévu, voire instabilités hydrauliques du fait des perméabilités des terrains plus élevées que prévu, d'un toit de la couche d'ancrage peu perméable plus profond, de bancs granulaires continus dans cette couche sous les parois alimentant la fouille ;

- Présence de blocs de taille importante dans les terrains ;
- Présence de vestiges, fondations ...
- Pollution des terrains ;
- Caractéristiques mécaniques des terrains plus faibles que prévu.

Des mesures préventives ont ainsi été retenues pour réduire ces risques en fonction de leur évaluation :

- Sondages géotechniques et essais d'eau complémentaires ;

- Fiche des parois moulées minimale imposée à la consultation (y compris dans les variantes) ;

- Essai de pompage en vraie grandeur après réalisation des parois moulées et avant début de l'excavation ;

- Préconisation de matériel adapté pour la réalisation des travaux (mise à disposition de l'hydrofraise notamment, imposée dans la consultation) ;

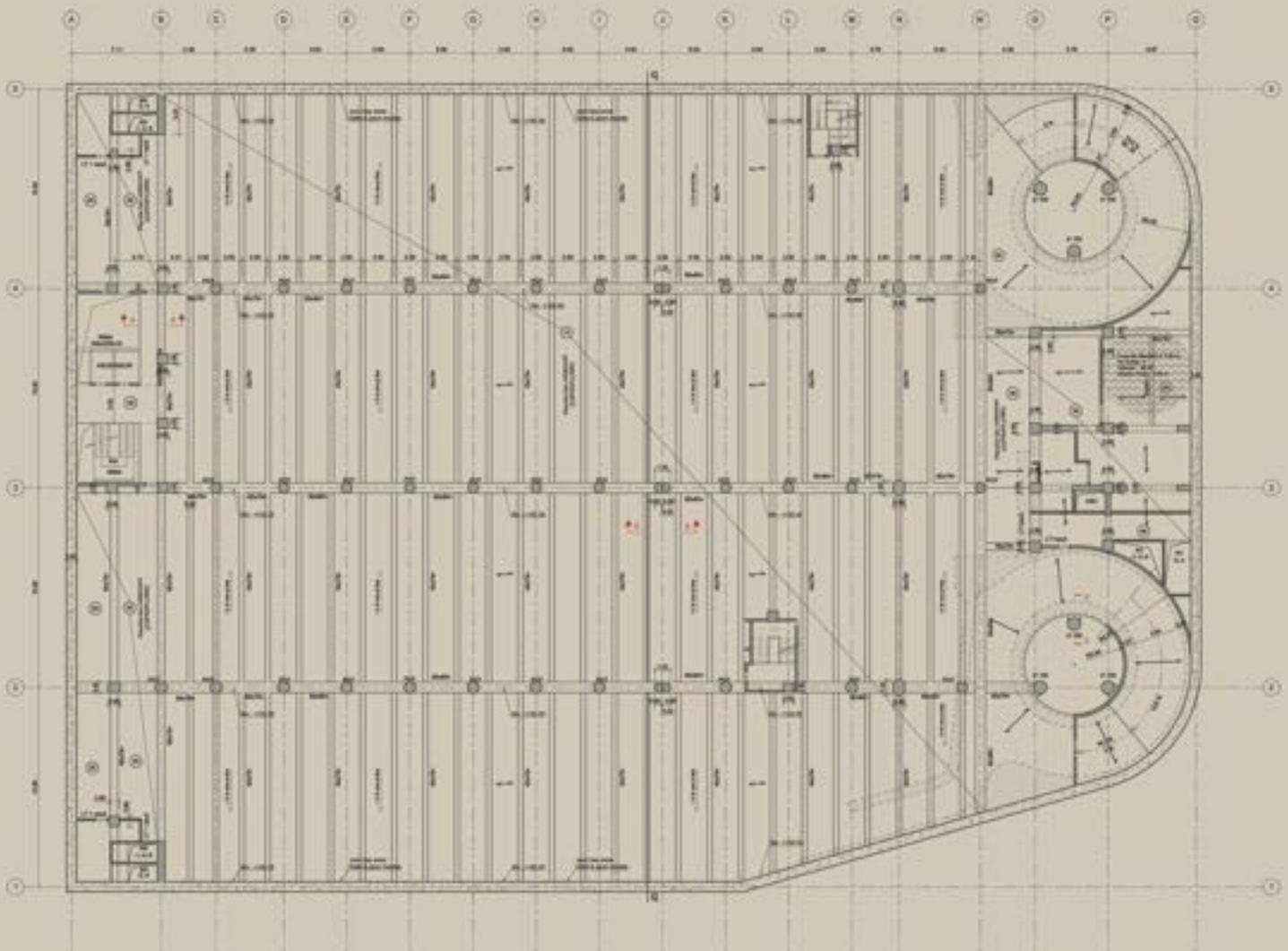
- Sondages et essais chimiques selon une répartition régulière pour définir les mailles de terre polluées.

Et des mesures de détection au plus tôt ont été définies pour déterminer si le risque résiduel se produit et alors mettre en œuvre des mesures correctives, comme une jupe d'étanchéité

3- Vue en plan d'un niveau du parking.

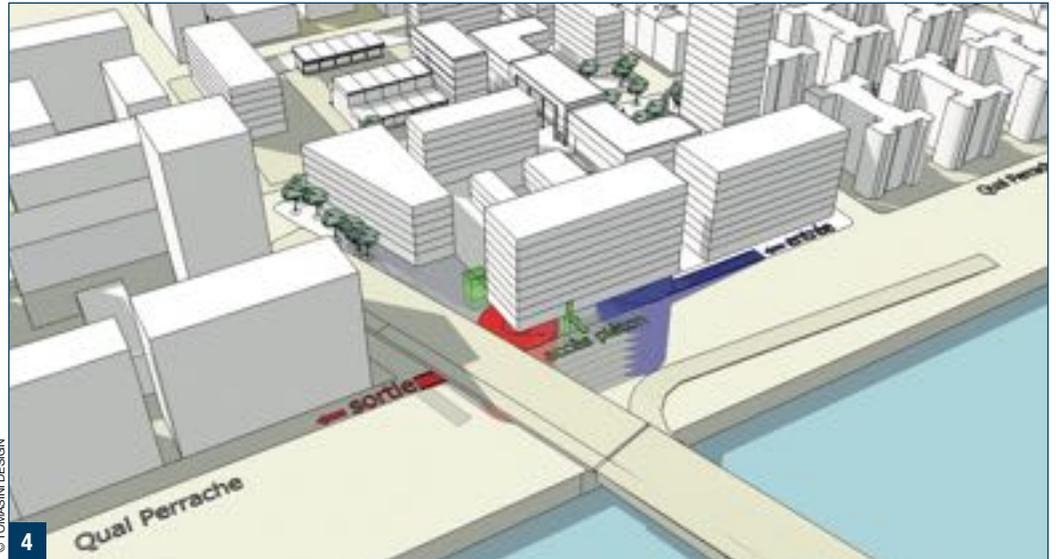
3- Plan view of a car park level.

VUE EN PLAN D'UN NIVEAU DU PARKING

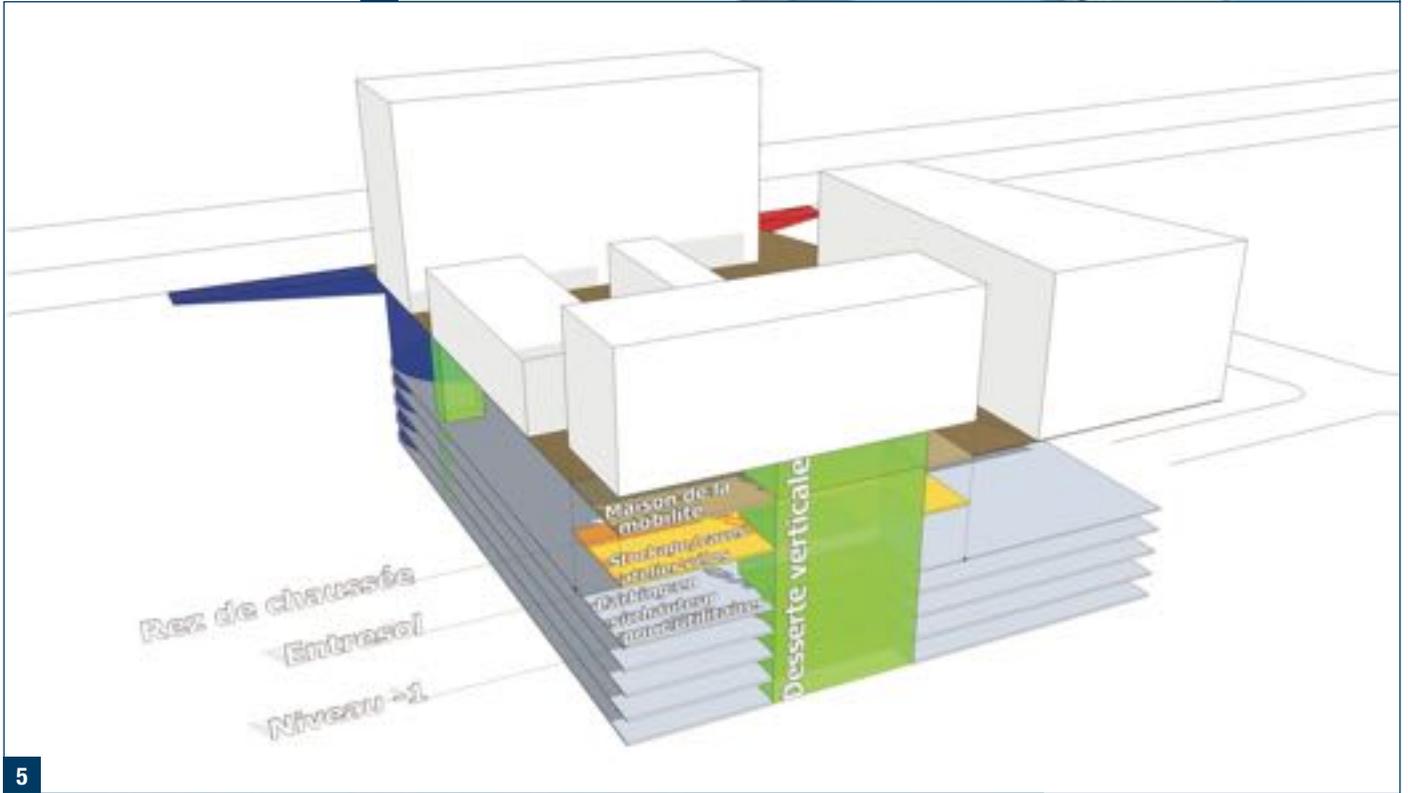


- 4- Schéma d'accessibilité au parking.
- 5- Schéma des fonctionnalités du parking.
- 6- Insertion urbaine du parking.

- 4- Car park accessibility diagram.
- 5- Diagram of car park functionalities.
- 6- Urban integration of the car park.



© TOMASINI DESIGN



© TOMASINI DESIGN



© TOMASINI DESIGN

sous les parois moulées en cas de débit trop important ou l'allongement des parois moulées en fonction du suivi géologique du forage de celles-ci. Ces risques et mesures associées ont été contractualisés dans la consultation en les définissant clairement ainsi que leur mode de rémunération (inclus dans le forfait de l'entreprise ou rémunéré selon un Bordereau des Prix Unitaires Risques ou sur négociation pour les risques exceptionnels). Cette analyse de risques devait être complétée par les entreprises en phase de consultation. Elle a ensuite été finalisée lors de la mise au point du marché.



RÉALISATION DES TRAVAUX

La consultation restreinte pour le lot Génie Civil a été lancée fin janvier 2015, et le DCE a été adressé aux 5 candidats retenus en mai 2015.

Ce lot comprend les parois moulées, les tirants, les terrassements, le pompage, le gros œuvre, les VRD, l'étanchéité et les peintures sur béton.

Les offres ont été remises début juillet 2015 puis leur analyse s'est déroulée pendant l'été 2015. Le marché de génie civil a été attribué en octobre 2015 au groupement Eiffage (mandataire) + Spie Fondations.

Des variantes ont été proposées mais seule une modification de l'étanchéité en couverture a été retenue.

Les travaux ont démarré en décembre 2015 avec les études d'exécution.

Les entreprises ont notamment repris à leur compte et complété l'analyse de risques. Puis elles ont décliné les procédures qui permettent, si les mesures de détection dépassent les seuils fixés au préalable, de prendre rapidement la décision adaptée.

Les travaux préparatoires ont également débuté, notamment les terrassements. Ces derniers ont mis en évidence la présence d'éléments amiantés qu'il a fallu traiter.

Cet aléa n'était pas identifié comme risque car aucune donnée ne le permettait. Il a donc été traité en complément au marché de base : l'analyse de risques ne permet pas d'atteindre le « risque zéro » mais elle constitue un outil permettant d'en anticiper le plus possible (mesures associées et rémunération) afin d'en réduire les conséquences (coûts et délais). Mais des risques résiduels voire invisibles demeurent.

Les travaux de parois moulées ont ensuite démarré début février 2016 après la réalisation des murettes guides. Ils se sont achevés fin avril 2016 soit 12 semaines de travaux pour 292 m de parois de 37 m de

profondeur (10 800 m²) avec plus de 10 000 m³ de béton et 780 t d'acier de ferrailage. Cela représentait 42 panneaux de parois moulées soit 3 à 4 panneaux forés et bétonnés par semaine.

Pour cela, 2 machines benne-pre-neuse (figure 10) et une hydrofraise (figure 11) étaient présentes sur le chantier. 2 panneaux étaient forés en même temps pendant qu'un autre était bétonné. Les panneaux courants mesuraient 7,5 m de long et nécessitaient 230 m³ de béton et 20 t d'acier (figure 12).

7- Vue des cages d'escaliers.

8- Vue d'une rampe d'accès.

9- Coupe de principe de conception.

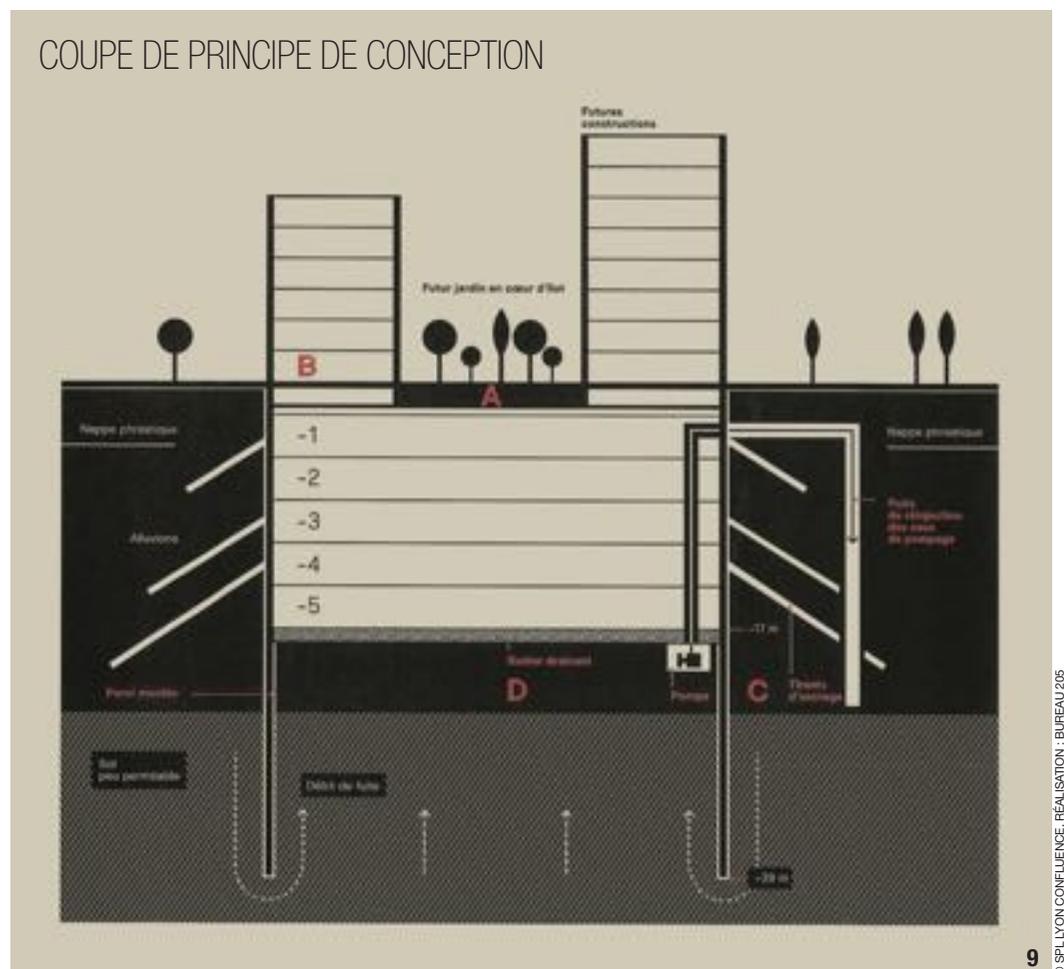
7- View of the stairwells.

8- View of an access ramp.

9- Schematic design cross section.

Le suivi géologique d'exécution lors du forage des panneaux n'a pas mis en évidence de toit de la couche d'ancrage plus profond que prévu ni de passée granulaire en base de paroi moulée : aucun panneau n'a donc été allongé. Puis la tête des parois moulées a été recépée et la poutre de couronnement a été réalisée.

Après la réalisation des parois moulées, l'essai de pompage a été effectué en mai 2016. L'objectif de cet essai était de vérifier les débits par rapport aux estimations et ainsi les hypothèses retenues, la bonne réalisation de la paroi et





© ARCADIS - C. LUQUET
10

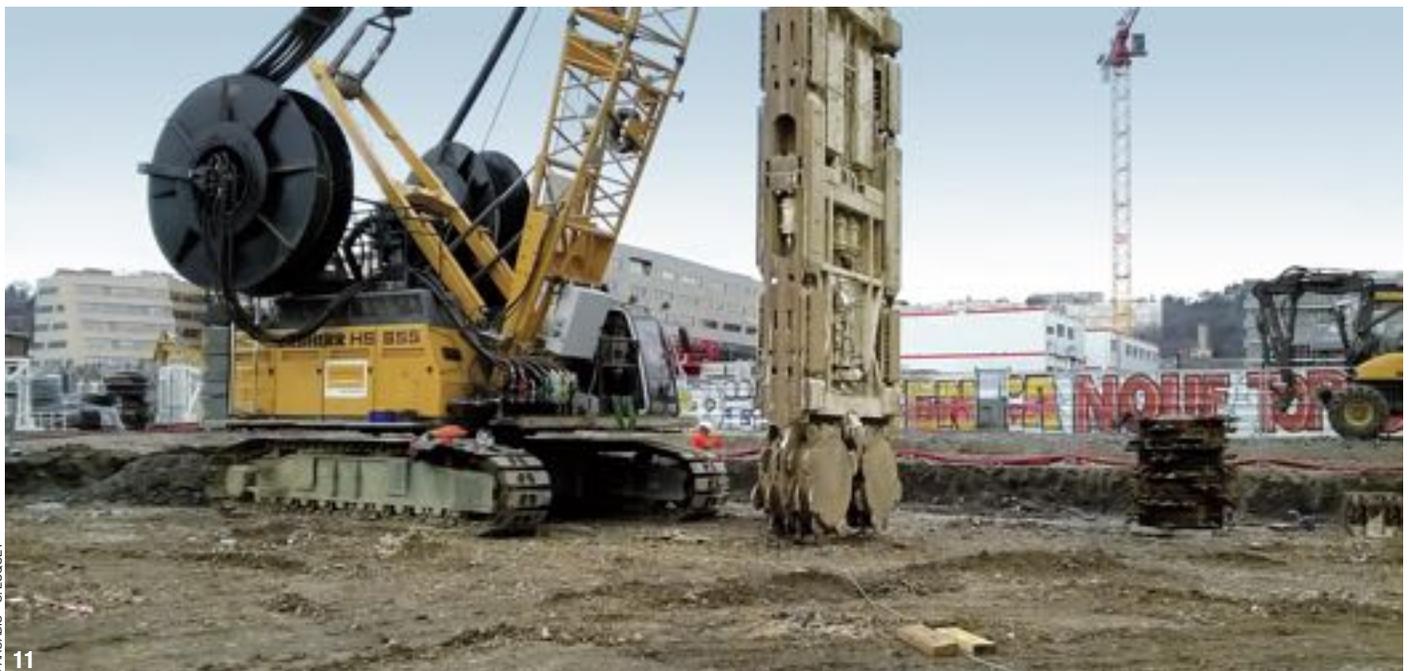
les éventuels aléas. Cet essai consistait à rabattre le niveau d'eau à l'intérieur de l'enceinte des parois moulées sous le niveau de fond de fouille, comme il serait fait ensuite lors de l'excavation, c'est-à-dire d'environ 17 m. Durant cet essai, de nombreuses mesures étaient réalisées : débit pompé, niveaux piézométriques à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte, cellules de pression interstitielle à la base des parois moulées. Cet essai a confirmé les études notamment les débits attendus (plutôt la borne minimale c'est-à-dire sans aucun aléa). Ceci a permis de fiabiliser

10- Forage d'un panneau de paroi moulée à la benne preneuse.
11- Machine hydrofraise pour le forage des parois moulées.

10- Diaphragm wall panel drilling by clam-shell grab.
11- Hydrofraise machine for diaphragm wall drilling.

la conception et la réalisation des parois moulées en vue du rabattement et de l'excavation de la fouille. Les terrassements, le rabattement de la nappe dans l'enceinte, la réalisation et la mise en tension des tirants ont ensuite démarré en juin 2016. La coactivité entre ces différents travaux (figure 13) a posé quelques problèmes de phasage : comme ces 4 postes sont entièrement liés, si l'un prenait plus de temps que prévu, il remettrait en cause le phasage de l'ensemble qui devait être adapté pour ne pas arrêter un des postes de travaux.

En particulier, la réalisation des tirants sous plusieurs mètres d'eau et donc sous sas et dans les terrains alluvionnaires a été compliquée et a entraîné de nombreux changements de phasage que l'entreprise a su néanmoins gérer. 2 à 3 tirants étaient forés et/ou injectés en même temps. Ces travaux se sont terminés en octobre 2016 soit une durée d'environ 4 à 5 mois pour près de 100 000 m³ de terre évacuée, 326 tirants de 22 à 31 m de longueur chacun, répartis sur 3 lits pour un linéaire total d'environ 9 km. ▷



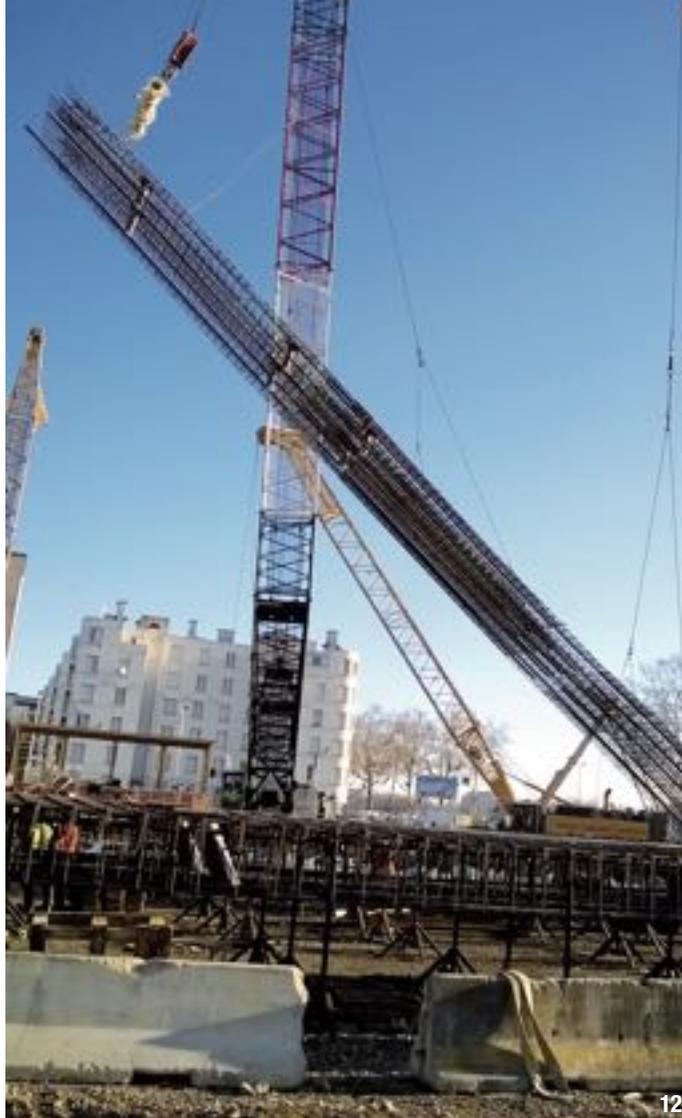
© ARCADIS - C. LUQUET
11

Durant ces travaux, le pompage a présenté quelques pics par rapport à la valeur estimée en études et confirmée lors de l'essai de pompage de 10 m³/h. Cela a entraîné des analyses de ces débits complémentaires non négligeables de l'ordre de 20 m³/h ; ces augmentations provenaient en fait du forage des tirants qui amenaient environ 6 m³/h chacun (eau de forage + eau venant de la nappe extérieure). Par ailleurs, le suivi de la déformation des parois moulées et du déplacement des avoisinants a confirmé les études menées au préalable.

À ce jour, aucune mesure préventive du bordereau des risques n'a donc été mise en œuvre.

À partir de la fin du mois de septembre, en parallèle de la fin de l'excavation et de la réalisation de tirants, les grues ont commencé à être montées pour les travaux de gros œuvre.

Ces derniers ont débuté mi-octobre 2016 avec la réalisation des fondations superficielles au fond de la fouille (figure 14).



12

© ARCADIS - C. LUQUET

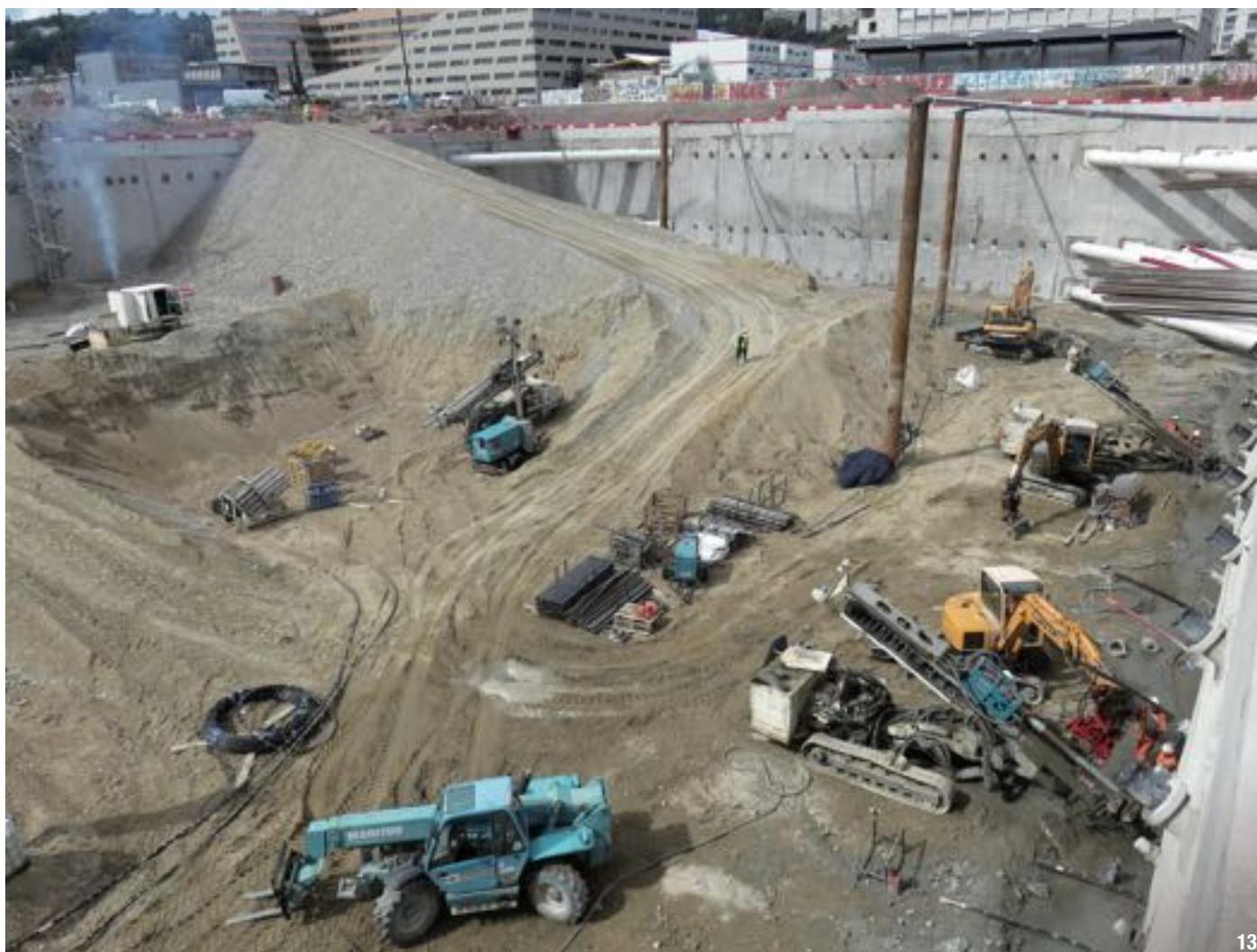
12- Mise en place d'une cage d'armatures d'un panneau de paroi moulée.

13- Vue générale des différents travaux dans la fouille.

12- Placing a concrete reinforcing cage in position for a diaphragm wall panel.

13- General view of various works in the excavation.

Ils se poursuivent actuellement avec la réalisation des fosses, des réseaux sous dallage, drainage et tapis drainant puis coulage du dallage avant la réalisation des travaux en élévations (dalles/poteaux/poutres) jusqu'au rez-de-chaussée.



13

© ARCADIS - C. MARCHAT



14

© ARCADIS - R. PARROT

Ils dureront jusqu'en juillet 2017 selon le planning prévisionnel actuel.

Ils comprennent :

- 10 km de poutres ;
- 25 000 m² de plancher soit 5 000 m² par niveau ;

14- Réalisation des semelles de fondations.

14- Execution of foundation slabs.

→ 13 000 m³ de béton (hors paroi moulée) ;

→ 1 600 t d'acier (hors paroi moulée).

Cela nécessitera environ 50 personnes en poste pour 60 000 heures de main d'œuvre.

Les mesures de détection (notamment le suivi des déformations des parois moulées et des déplacements des

avoisnants, et des débits de pompage) ainsi que les procédures de mise en œuvre des actions correctives seront poursuivies jusqu'à la finalisation du Gros Œuvre. La détente des tirants démarrera après la réalisation de la dalle haute du parking.

La mise en service de ce parking est prévue pour début 2018. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- 5 200 m² d'emprise au sol
- Surface construite : 25 000 m² pour 814 places de stationnement sur 5 niveaux de sous-sol
- 292 m de parois moulées de 37 m de profondeur soit environ 10 800 m² de parois avec plus de 10 000 m³ de béton et 780 t d'acier de ferrailage
- Profondeur de la fouille : environ 17 m
- 100 000 m³ de terre évacuée
- 326 tirants de 22 à 31 m de longueur chacun pour un linéaire total d'environ 9 km
- 10 km de poutres et 25 000 m² de plancher (soit 5 000 m² par niveau) nécessitant 13 000 m³ de béton et 1 600 t d'acier
- Pompage en phase travaux : 10 à 30 m³/h
- Montant du lot Génie Civil : 18 809 k€

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : SPL Lyon Confluence

CSPS : Alpes Contrôles

BUREAU DE CONTRÔLE : Alpes Contrôles

ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE :

Asco Consulting / Tribu / Artelia

MAÎTRISE D'ŒUVRE (GROUPEMENT) :

Arcadis (mandataire) / Agence Carbonnet Architectes / Tomasini design /

Cap Ingelec

ENTREPRISES DU LOT GÉNIE CIVIL :

Eiffage (mandataire) / Spie Fondations

ABSTRACT

FIRST SHARED CAR PARK IN THE LYON CONFLUENCE DISTRICT

MATHIEU AVRIL, ARCADIS - ROLAND PARROT, ARCADIS

The first shared car park in Lyon Confluence is under construction.

The design work led to the selection of diaphragm walls anchored in a layer of relatively impermeable soil with prestressed tie rods and pumping in the provisional phases, and strutted floors and a draining foundation raft in the permanent phases. Based on experience feedback from many Lyon car parks built on the same principles, risk management was initiated in the design stage and then contractualised in the work contract. The contractors then applied it notably via preventive and detection measures. At present, now that the wall and excavation works have been completed, no corrective measure has had to be implemented and the work is being performed without any particular problem. □

PRIMER PARKING COMÚN EN EL BARRIO DE LYON CONFLUENCE

MATHIEU AVRIL, ARCADIS - ROLAND PARROT, ARCADIS

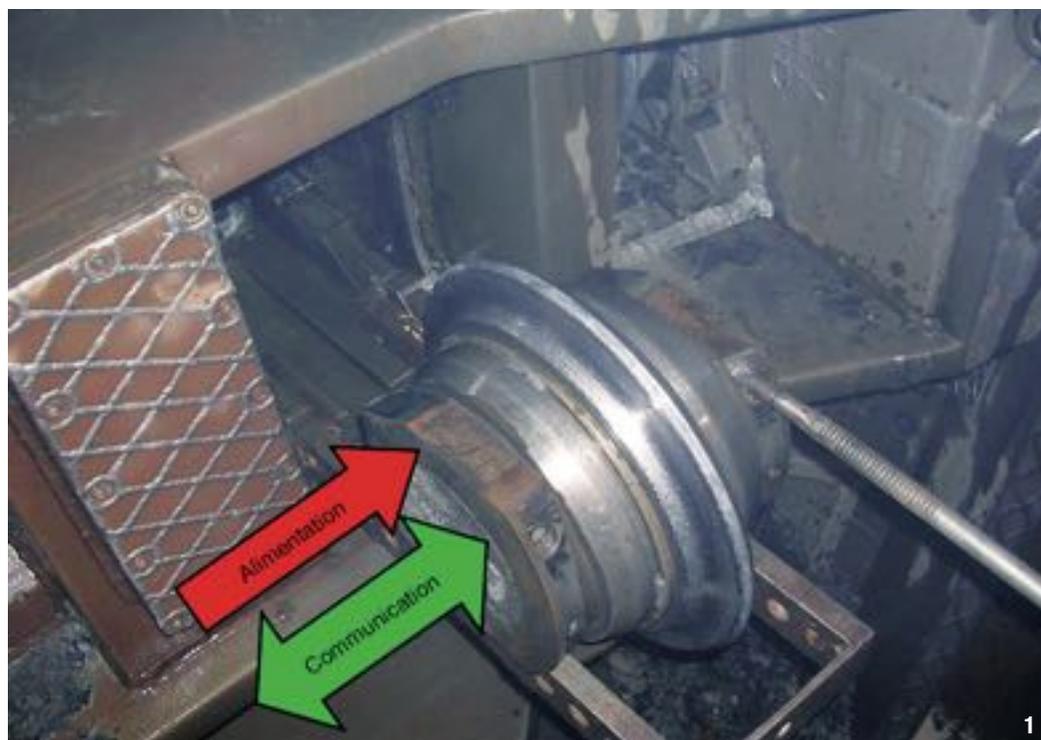
Se está construyendo el primer parking común de Lyon Confluence.

Tras los estudios, se ha decidido construir muros de contención anclados en una capa de suelo poco permeable con tirantes pretensados y bombeo en las fases provisionales, y forjados apuntalados y losa de cimentación drenante en las fases definitivas. Sobre a base de la experiencia adquirida tras la construcción de numerosos aparcamientos en la ciudad de Lyon según los mismos principios, se ha implementado una gestión de los riesgos durante la fase de diseño, que seguidamente se ha contractualizado en el contrato de obra, y que las empresas han aplicado principalmente por medio de medidas preventivas y de detección. A fecha de hoy las obras de las paredes y de excavación han concluido sin necesidad de aplicar ninguna medida correctiva, y la realización de las obras se está desarrollando sin ninguna incidencia particular. □

MOBYDIC, L'ŒIL DU PILOTE SUR LE FRONT DE TAILLE

AUTEUR : PIERRE MOULIN, CHEF DE SERVICE, EN CHARGE DU PROJET MOBYDIC, DIRECTION TECHNIQUE DE BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

MOBYDIC (ACRONYME DE MONITORED BOUYGUES DISC CUTTER) EST LE SYSTÈME D'INSTRUMENTATION D'OUTILS DE COUPE DÉVELOPPÉ ET BREVETÉ PAR BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS. SI LA CHAMBRE D'ABATAGE EST AU CŒUR DU PROCESS DU TUNNELIER, C'EST POURTANT L'UNE DES PARTIES LES MOINS INSTRUMENTÉES DE LA MACHINE, SÛREMENT À CAUSE DE LA SÉVÉRITÉ DE SON ENVIRONNEMENT. FORT DE CETTE CONSTATATION, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS A ENTREPRIS LE DÉVELOPPEMENT DE CE SYSTÈME DANS LES ANNÉES 2000, ET JOUIT AUJOURD'HUI D'UN TRÈS BON RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR L'INSTRUMENTATION DE MOLETTES AINSI QUE SUR LA RICHESSE DES DONNÉES QU'ELLES GÉNÈRENT. CE PRODUIT, MAINTENANT INDUSTRIEL ET ABOUTI, EST SYSTÉMATIQUEMENT DÉPLOYÉ SUR LES CHANTIERS DE TUNNEL RÉPUTÉS DIFFICILES DE BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

INTRODUCTION

Parce que les tunneliers fonctionnent dans des géologies de plus en plus perturbées et difficiles, le risque d'endommager une tête coupe est de plus en plus élevé lorsqu'on ne dispose pas, en temps réel, de données fiables sur le front taille. Parce que ces machines creusent de plus en plus

profond, les opérations hyperbares pour le remplacement des molettes sont de plus en plus risquées, longues et coûteuses.

Afin de limiter ces risques, Bouygues Travaux Public a décidé de développer un système d'instrumentation implantée au cœur des molettes : Mobydic « l'œil du pilote sur le front de taille ».

1- Communication et alimentation sans fil du capteur embarqué.

1- Wireless communication and power supply for the on-board sensor.

LE PRINCIPE DU SYSTÈME

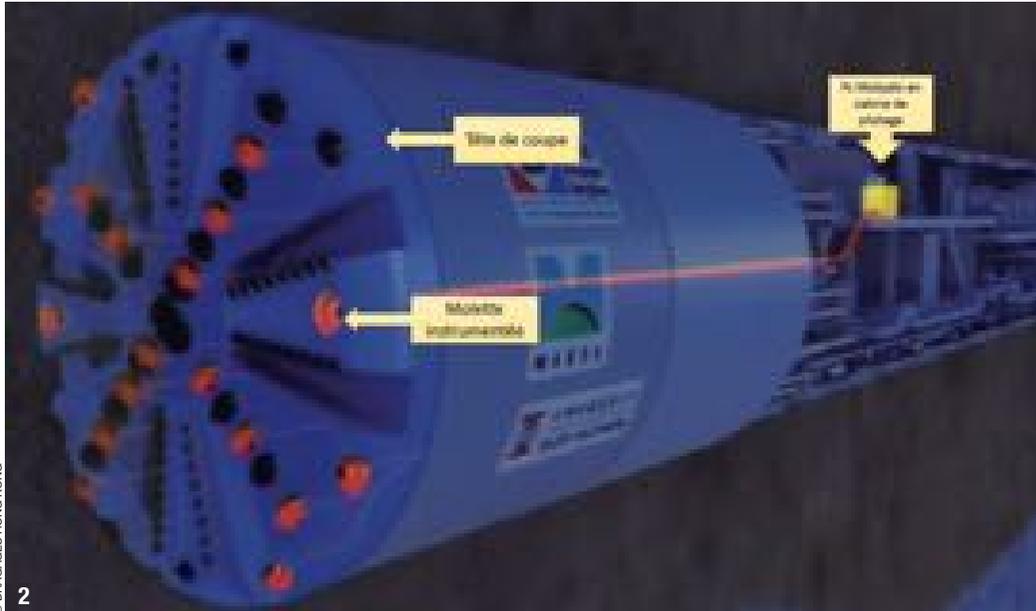
L'idée initiale, est de loger des capteurs (température, rotation, accélération, capteurs d'effort, etc.) dans des molettes et de transmettre ces informations en temps réel aux opérateurs du tunnelier ainsi qu'aux ingénieurs en charge des opérations afin d'optimiser le fonctionnement de la machine ainsi que sa maintenance.

L'environnement de la tête de coupe est très sévère (humidité, pression, abrasion, température élevée, vibrations chocs...).

L'opérateur doit être capable de remplacer une molette sans avoir à connecter le moindre fil. Pour cela, l'alimentation ainsi que la communication de la molette instrumentée avec le reste du système Mobydic se fait au travers d'une interface sans fil (figure 1).

Les molettes instrumentées renvoient leurs informations vers un PC (figure 2). Celui-ci traite et met en forme les données acquises de manière à restituer des informations pertinentes en temps réel sur un écran de supervision en cabine de pilotage. De plus, le système remonte des défauts vers l'automate de tunnelier pouvant impacter l'avance de la machine.

En surface, un autre PC connecté permet également le suivi en temps réel du front taille, l'étude des données acquises et aussi de rejouer des situations.



© DRAGAGES HONG KONG
2

LES APPLICATIONS DU SYSTÈME

Ce système, utilisé sur plusieurs chantiers, a démontré son utilité pour répondre à différentes problématiques.

UN SUVI DE LA GÉOLOGIE EN TEMPS RÉEL

Mobydic permet d'éviter de nombreuses interventions hyperbares aux géologues qui ont un retour permanent de la géologie rencontrée.

2- Vue générale de l'installation.

3- MTR 1128 Hong Kong : extrait du relevé géologique : PM client : 97626,6 m.

2- General view of the system.

3- MTR 1128 Hong Kong: excerpt from the geological survey: client PM: 97626.6 m.

Le système produit une diagraphie du front de taille en temps réel en fonction des différents paramètres. Grâce à ceci, le géologue dispose d'informations sur la totalité de la surface du front, alors que, lors d'un levé du front (figure 3), des zones sont souvent inaccessibles notamment au bas de la section (dû au niveau de slurry).

La détection de cavernes

Sur certains tronçons, un tunnelier peut rencontrer des zones de vide, voir des

cavernes importantes, comme cela est le cas sur le chantier de Liantang (Hong Kong). En figure 4, on remarque très nettement entre 9h et 12h sur la diagraphie de droite (adhérence) une zone verte à adhérence nulle où les molettes ne tournent pas. Dans la même zone, sur la diagraphie de gauche (efforts), aucun effort n'est observable.

Suivant les caractéristiques géologiques attendues, cela permet de mettre en évidence la présence d'une caverne.

La détection de bâtis

De plus en plus de tunneliers creusent en zones urbaines. Ils sont susceptibles de rencontrer sur leur passage des bâtis existants plus ou moins cartographiés et connus. Mobydic permet de détecter ces bâtis comme nous pouvons le voir dans les quelques exemples ci-après.

La détection de la forme d'un tympan creux sur le chantier de TMCLK

Sur le chantier de TMCLK (Hong Kong), le tunnelier S880 (diamètre 17,63 m) est équipé de 27 molettes instrumentées. Il attaque un tympan creux qui sert de test de validation au démarrage pour le système Mobydic.

Le retour du système sur l'excavation du tympan (figure 5) confirme le plan de design de celui-ci. La superposition est pratiquement parfaite.

La détection de piles en béton

sur le chantier 1128 (Hong Kong) :

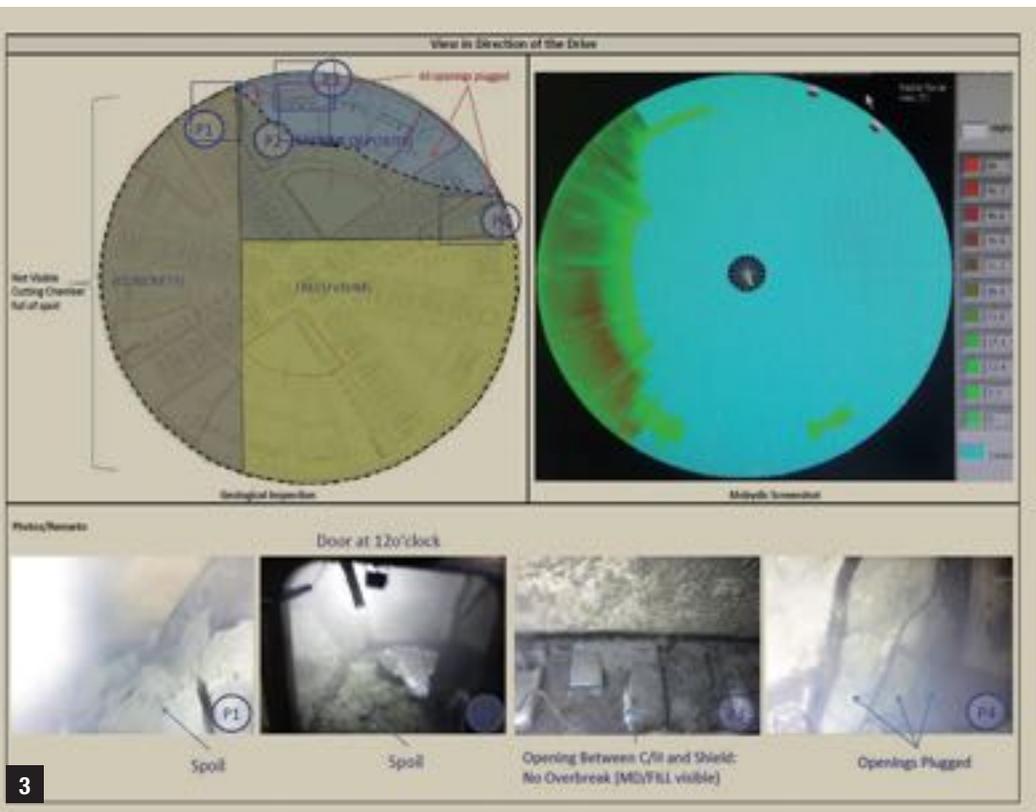
Le tunnelier avance en terrain meuble et rencontre une pile en béton sur la droite de la section qui se concrétise par une zone dure sur la diagraphie en effort située à gauche (figure 6). À cette zone dure correspond une zone d'adhérence maximale (sur la diagraphie en adhérence située à droite). Le suivi des 10 derniers anneaux fait apparaître une remontée significative de l'adhérence et de l'effort appliqué sur les molettes pendant le passage des piles.

La détection des piles métalliques sur MTR820 (Hong Kong) :

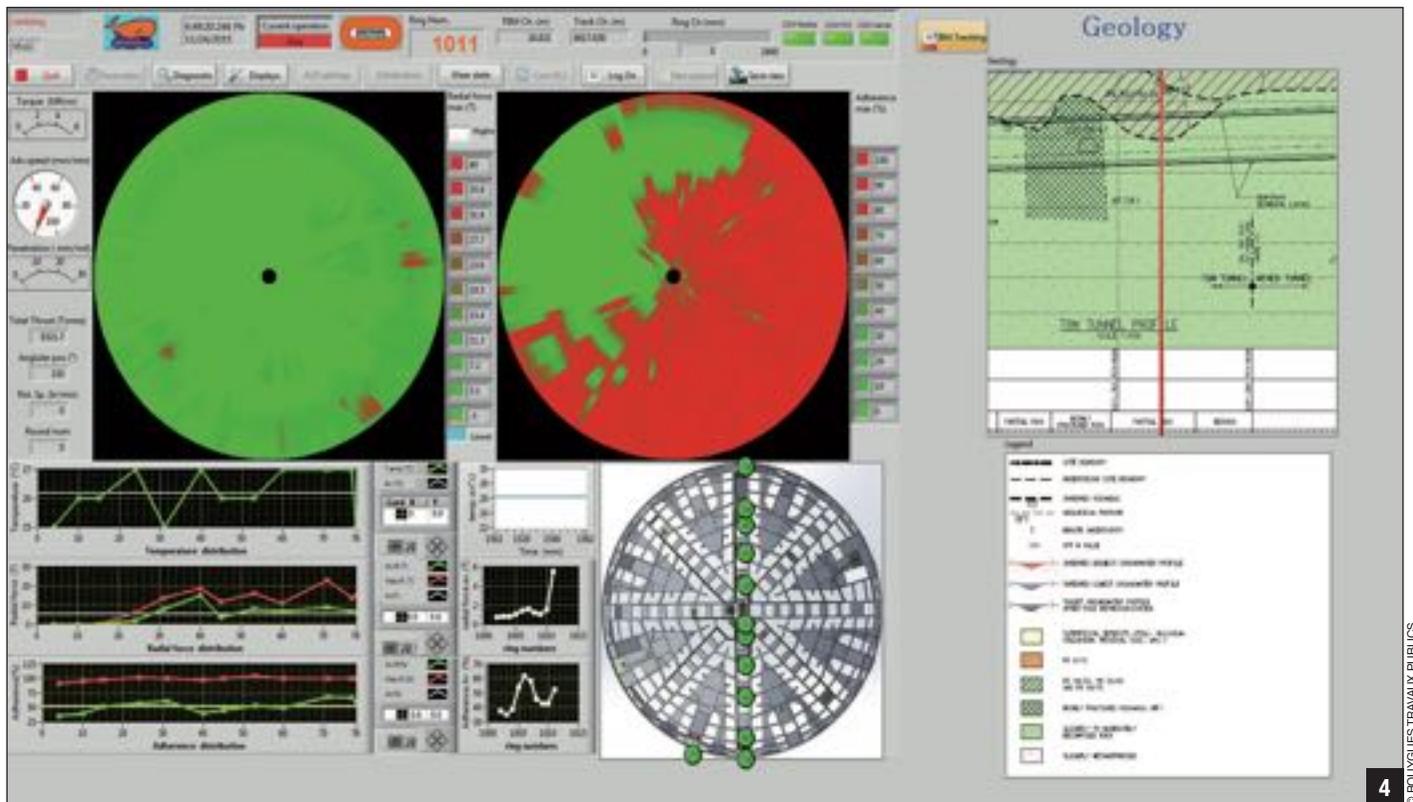
Sur le chantier MTR820 (Hong Kong), un des tunneliers a rencontré des piles métalliques (figure 7) non initialement prévues. Les données acquises par les molettes ont permis une analyse fine du contact de celles-ci avec la pile.

Si l'on zoome sur les données du contact d'une des molettes instrumentées avec la pile d'acier (figure 8), on constate :

- Une zone de sous-vitesse lors de la montée en effort ;
- Une zone de vitesse nominale ;
- Une zone de survitesse consécutive à la chute d'effort ;

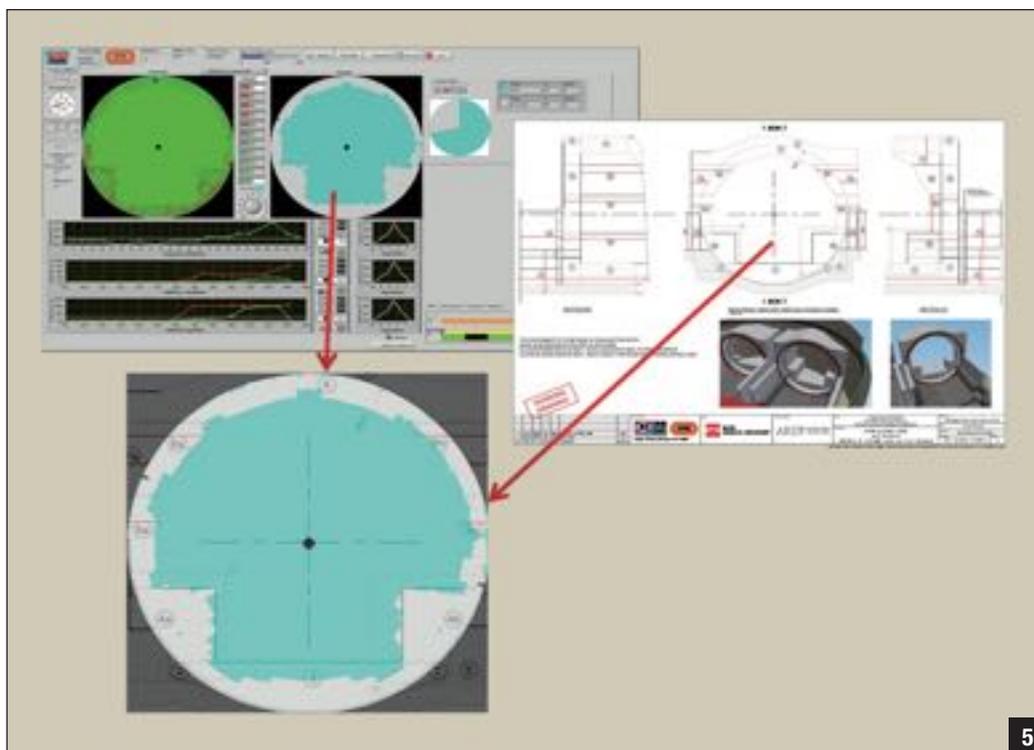


© DRAGAGES HONG KONG



4

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS



5

4- Liantang Hong Kong : visualisation d'une caverne.

5- TMCLK Hong Kong : visualisation du tympan creux.

4- Liantang Hong Kong: view of a cavern.

5- TMCLK Hong Kong: view of the hollow front wall.

deux *corestones* ainsi que les efforts maximum correspondants (50 et 75 T) détectés par les molettes #20 et #37 dans le graphe de distribution des efforts.

OPTIMISATION DE L'EXCAVATION

Adaptation de la pénétration

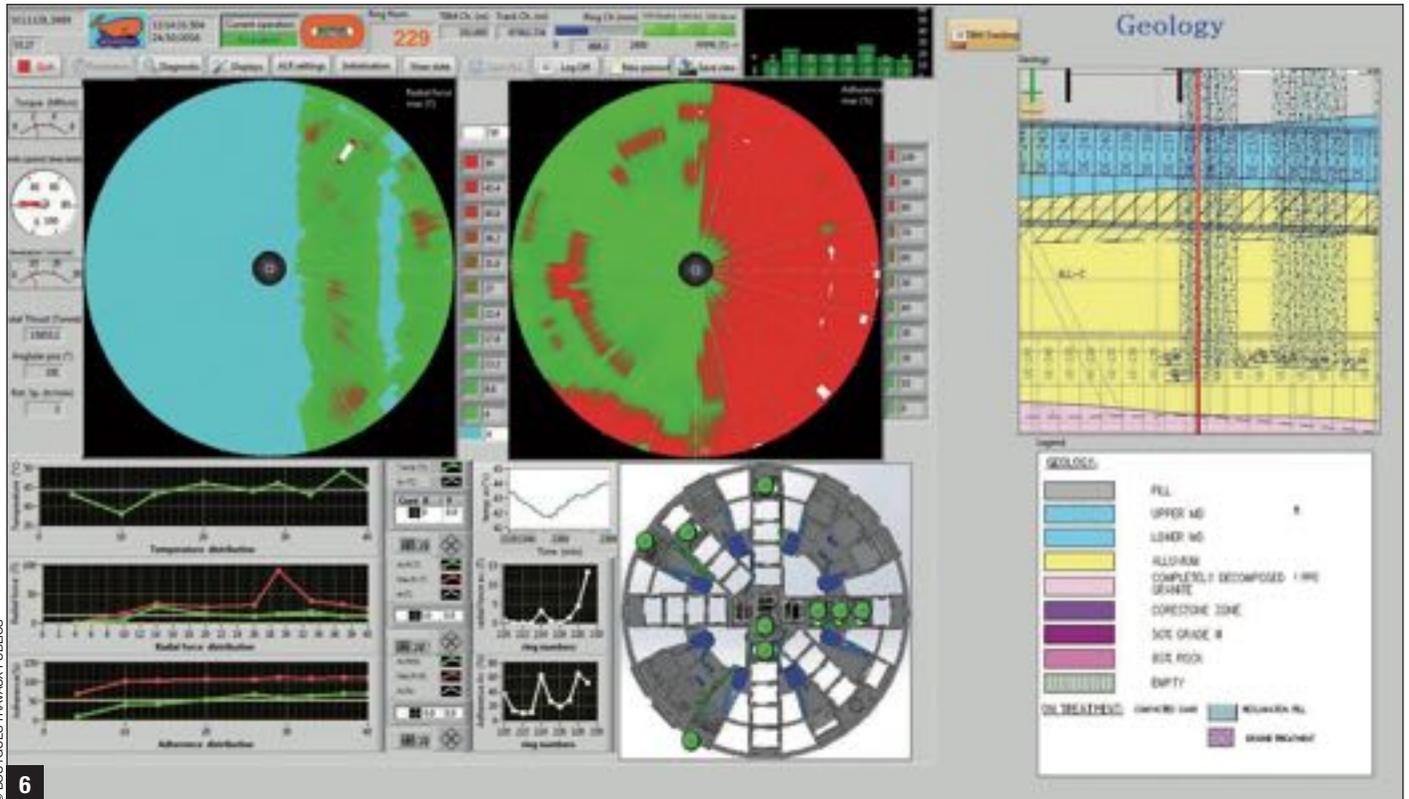
Comme vue précédemment, le système permet de détecter la présence de *boulder* et de *corestone*.

Grâce à cela, il est possible d'adapter les paramètres machine à la situation (Avancer rapidement en terrain meuble tout en limitant la pénétration en présence de *boulder* ou de *corestone*). Cela assure la préservation des molettes sur le trajet de l'obstacle, qui

→ Une zone intermédiaire de compensation ;
→ Une zone de sous-vitesse.
Une explication mécanique de la sur-vitesse suite au contact, serait, soit la déformation élastique de l'obstruction, soit une accélération de la molette après le passage de l'obstacle. (augmentation ponctuelle de l'avance). Il est à noter que, suite au pic d'effort,

aucune déformation importante de l'arbre n'est mesurée par le capteur d'efforts.
La sous-vitesse finale renforce l'hypothèse d'accélération de la molette entraînant une sur-pénétration ponctuelle et donc un freinage en rotation de celle-ci (figure 9).
Les efforts faibles, mais non nuls, lors de cette phase de sous-vitesse finale,

écartent une hypothèse de vide après l'obstacle et confirment également le pic d'avance de la molette suite au dépassement de l'obstruction.
Le système permet ainsi des analyses fines des contacts.
Détection de boulders et de corestones
Sur la figure 10, il est possible de repérer sur la diagraphie en effort



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS
6



© DRAGAGES HONG KONG
7

reprennent à elles seules une grande partie de l'effort de poussée du tunnelier.

Pour cela, des paramètres de limitation de pénétration ont été définis pour chaque molette, notés FFPR : « Force For Penetration Regulation », et entourés en rouge en partie supérieure de la figure 11.

La limite admissible de FFPR est dépassée pour la molette #37 (figure 11). La pénétration est ramenée de 17 à 15 mm/tour, les FFPR reprennent des

valeurs admissibles et la molette #37 est protégée (figure 12).

Détection des colmatages

Le colmatage d'une tête de coupe se crée généralement au centre de celle-ci où la vitesse relative est minimale. Puis, il se propage progressivement vers la périphérie jusqu'à un colmatage total de la tête.

Ceci entraîne une perte des performances de la machine et un arrêt de quelques jours pour une grosse opération de décolmatage.

Cette situation critique peut être évitée car le système Mobydic permet de détecter le tout début de la phase de colmatage.

Celle-ci se traduit par une perte progressive d'adhérence couplée à une montée en température sur les molettes du centre.

(Exemple de début de colmatage sur le chantier de Liantang Hong Kong en figure 13). Il s'agit alors de faire un court arrêt de nettoyage sur le centre et de repartir.

6- MTR 1128 Hong Kong : visualisation d'une pile béton.

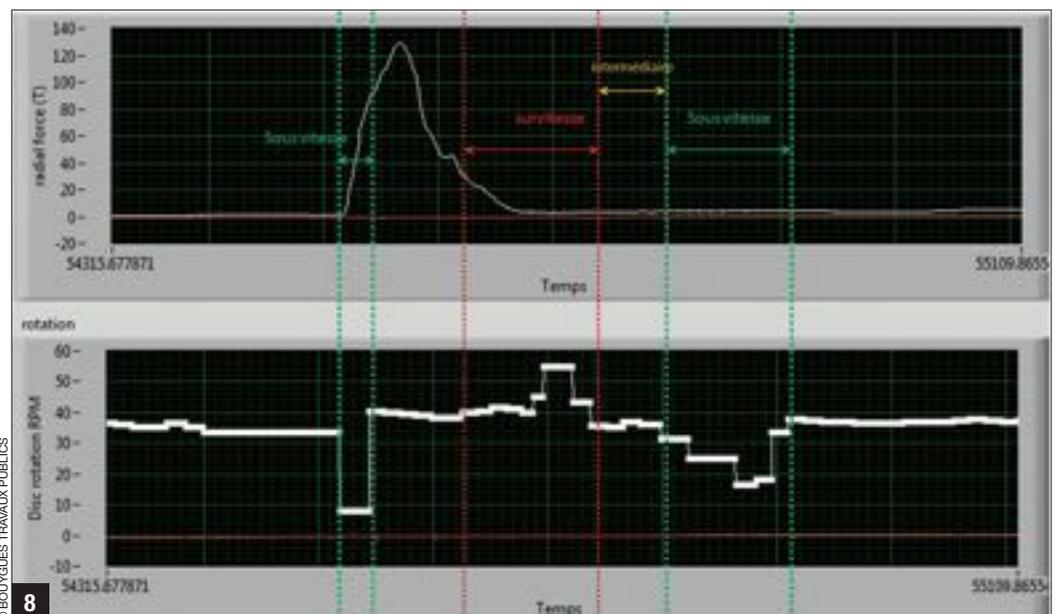
7- MTR 820 Hong Kong : visualisation d'une pile métallique.

8- MTR 820 Hong Kong : zoom sur les données au contact avec la pile métallique.

6- MTR 1128 Hong Kong: view of a concrete pier.

7- MTR 820 Hong Kong: view of a steel pier.

8- MTR 820 Hong Kong: zoom on data in contact with the steel pier.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS
8

L'OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE DES OUTILS

Le contexte

De par les géologies complexes rencontrées et les profondeurs de creusement de plus en plus élevées, les opérations de changement de molettes sont de plus en plus risquées. Elles se traduisent par des interventions hyperbares à de fortes pressions, limitant les temps de travail dans la chambre d'abatage et nécessi-

tant de longs paliers de décompression. Mobydic contribue à sécuriser et à réduire ces opérations grâce aux informations qu'il rend disponibles.

La connaissance de la tenue du front partie haute

Sur le chantier de TMCLK, avant d'arrêter le creusement et de lancer une intervention hyperbare, les équipes regardent l'écran Mobydic. Si il n'y a pas d'adhérence en partie haute de la

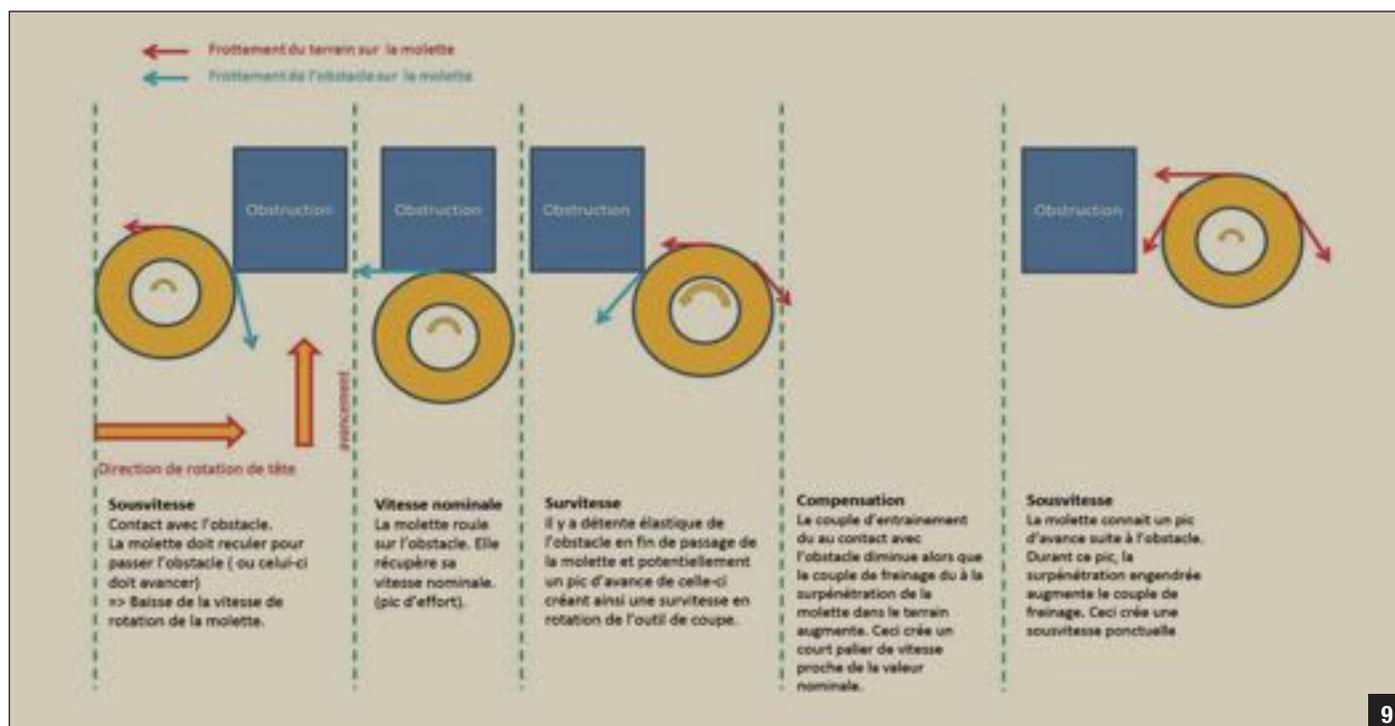
section (comme cela est le cas sur la figure 14), on en déduit que la voûte n'est pas stable et que l'opération est risquée. Le tunnelier reprend alors son excavation et avance un peu plus loin jusqu'à ce que les conditions soient acceptables. Par leur analyse de la situation, grâce à Mobydic, les équipes productions gagnent du temps en évitant de lancer inutilement une intervention hyperbare (préparation + compres-

9- MTR 820 Hong Kong : hypothèse de déformation élastique sur le support de la molette.

10- MTR 1128 Hong Kong : détection de corestone.

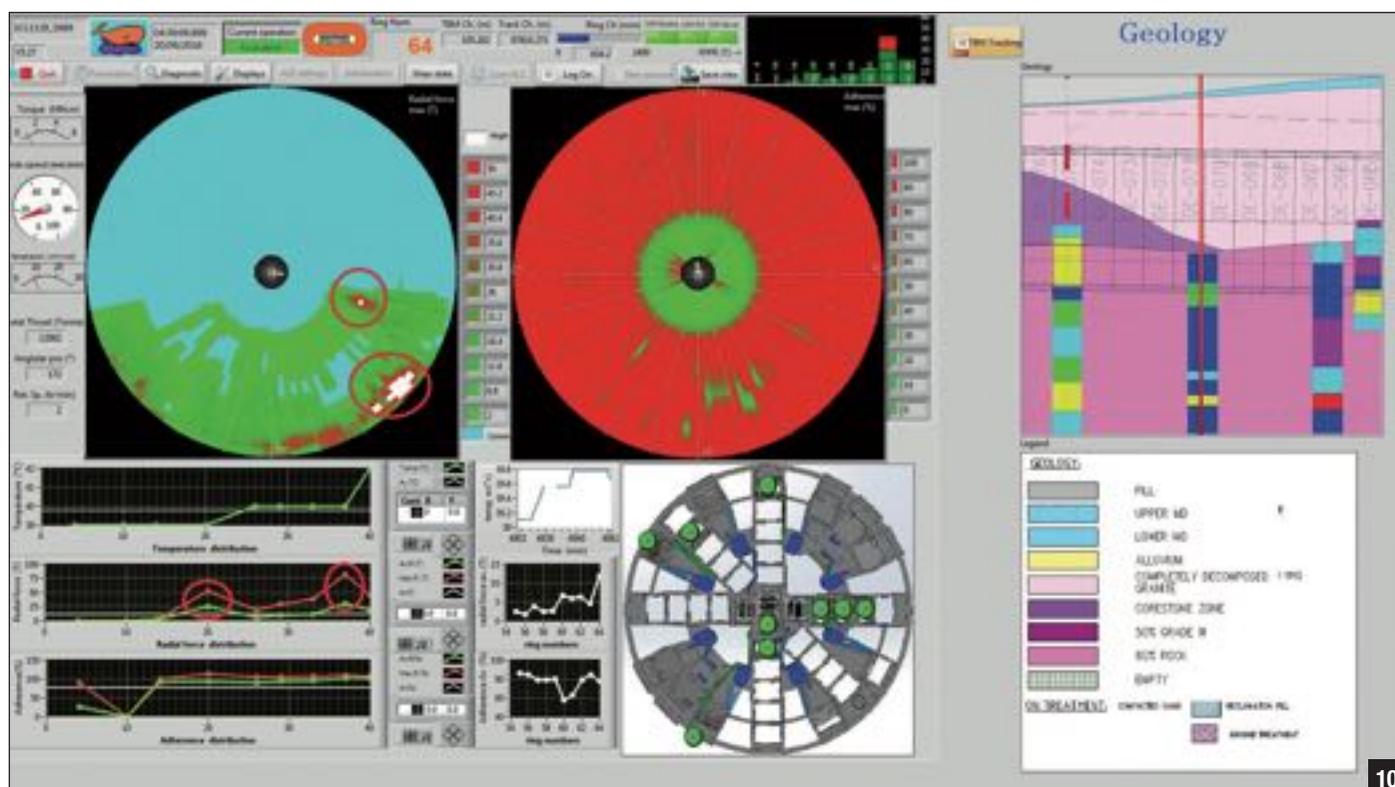
9- MTR 820 Hong Kong : hypothesis of elastic strain on the disc-cutter mounting.

10- MTR 1128 Hong Kong: detection of corestone.



9

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS



10

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

11- MTR1128 Hong Kong : *boulder* avant limitation de la pénétration.

12- MTR1128 Hong Kong : *boulder* après limitation de la pénétration.

11- MTR1128 Hong Kong : *boulder* before penetration limiting.

12- MTR1128 Hong Kong : *boulder* after penetration limiting.

sion et décompression de personnel) dans une zone risquée et sécurisent l'intervention qu'ils feront quelques centaines de mm plus loin.

La connaissance du niveau de roche

La connaissance du niveau de roche a un grand intérêt lorsqu'on change les molettes à 3h et à 9h comme sur le

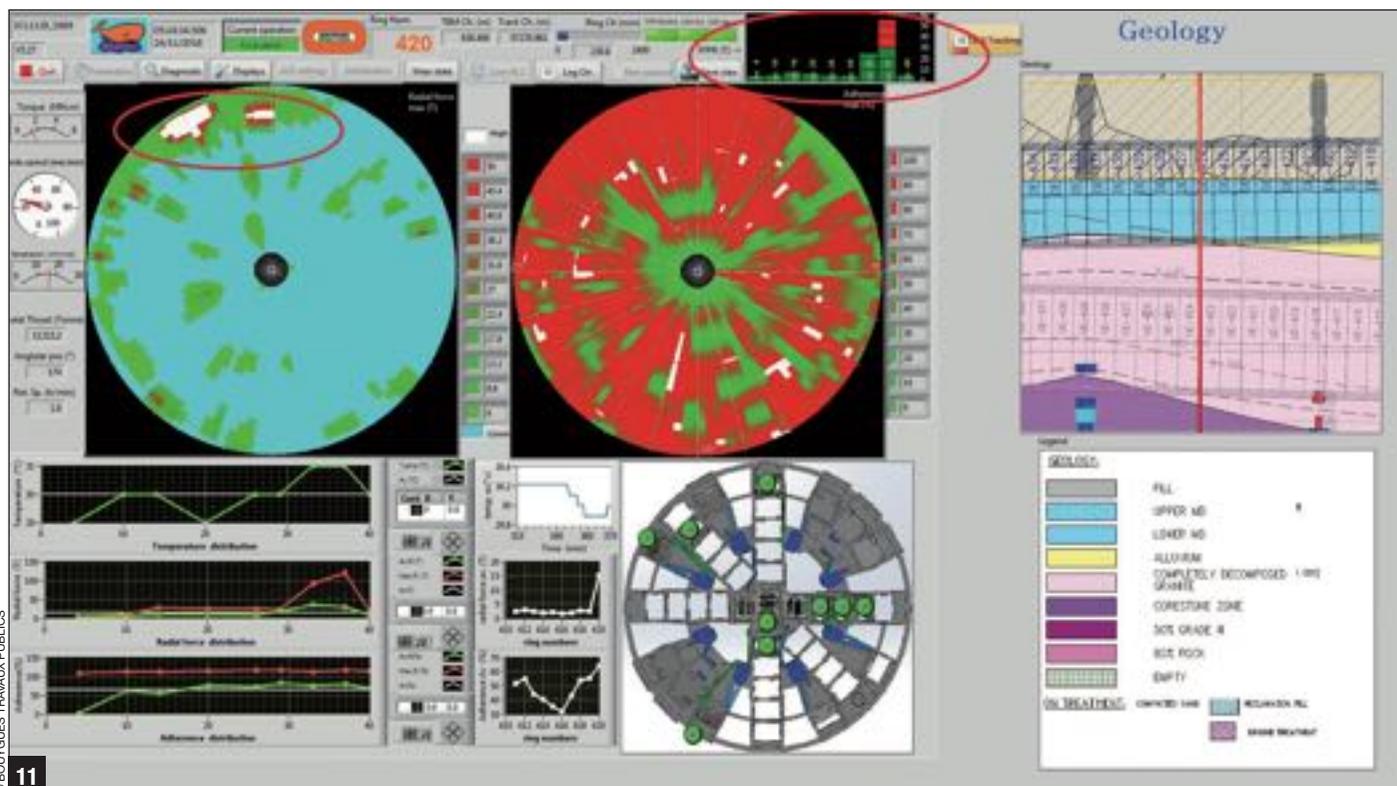
tunnelier S880 du chantier TMCLK à Hong Kong (tunnelier Ø 17,3 m : record mondial).

Mobydic donne cette information directement en cabine (figure 15). Ainsi, le pilote sait s'il a besoin d'actionner la surcoupe ou non, avant l'arrêt pour l'intervention, afin d'être capable de remplacer des molettes périphériques

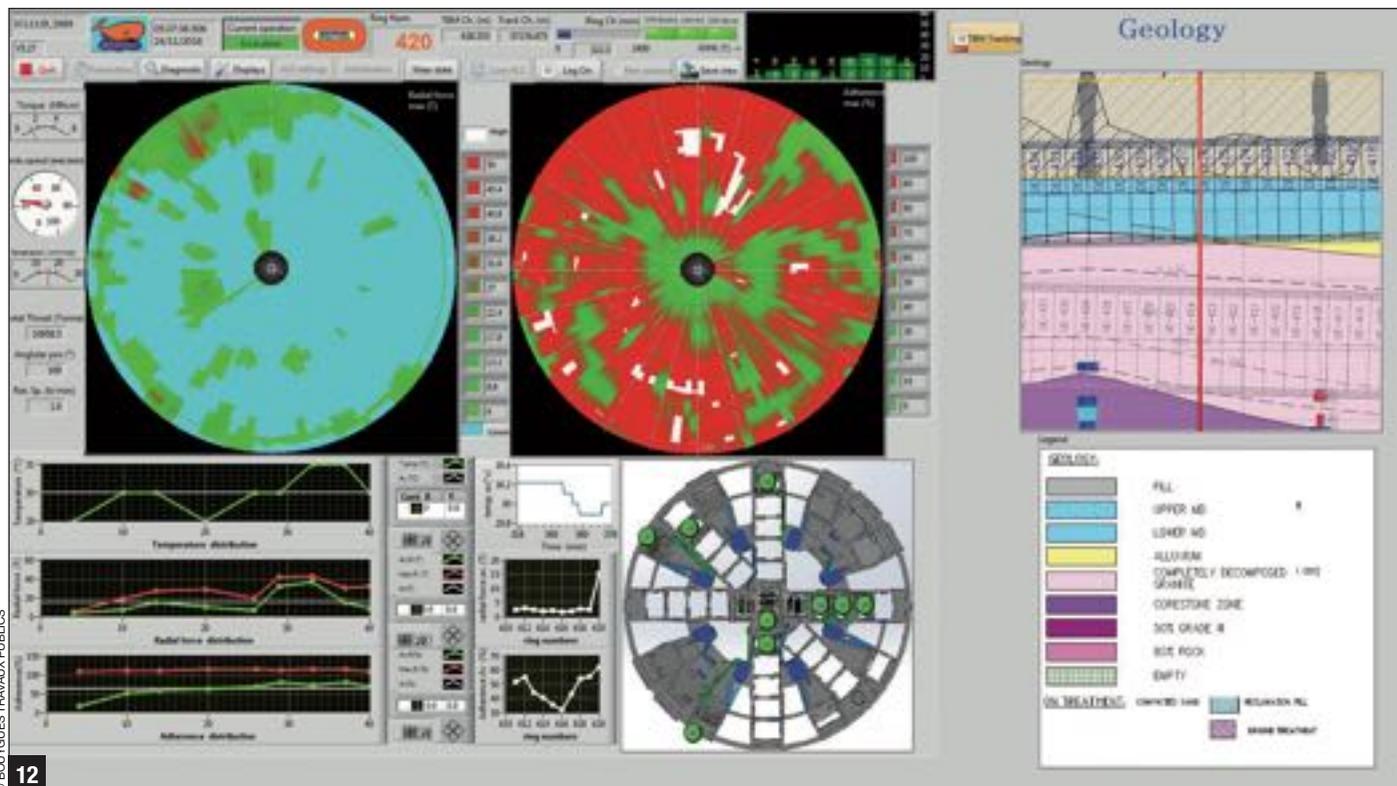
usagées par des neuves. Sur l'exemple présent, le niveau de roche est bien en dessous de l'axe. Le pilote ne fera pas de surcoupe avant l'arrêt prévu pour l'intervention.

Le suivi de l'usure

Grace à ses capteurs, Mobydic est capable de calculer l'usure des molettes et d'afficher les résultats ▷



11



12

en cabine, ainsi que sur le poste de consultation en surface.

De ce fait, la planification de la maintenance de la tête de coupe peut être optimisée. De par ces informations, il peut être décidé de déclencher une intervention de changement de molettes. Qu'une intervention soit déclenchée ou planifiée, les données

d'usure (figure 16), contribuent à une meilleure connaissance de l'état de la tête. Grâce à elles, une anticipation et une optimisation de l'intervention sont rendues possibles.

Le suivi automatique des outils

Une vue dédiée du système affiche, notamment, le nombre de fois qu'une molette a été remplacée dans son

caisson, l'historique des changements (à quels anneaux ont été effectués les remplacements), le volume excavé par les outils en place ainsi qu'un rappel des usures (figure 17). À terme, ces informations seront disponibles sur toutes les molettes.

La détection des bris de molette

Un bris de molette (écaillage du disque

13- Liantang Hong Kong : détection de début de colmatage.

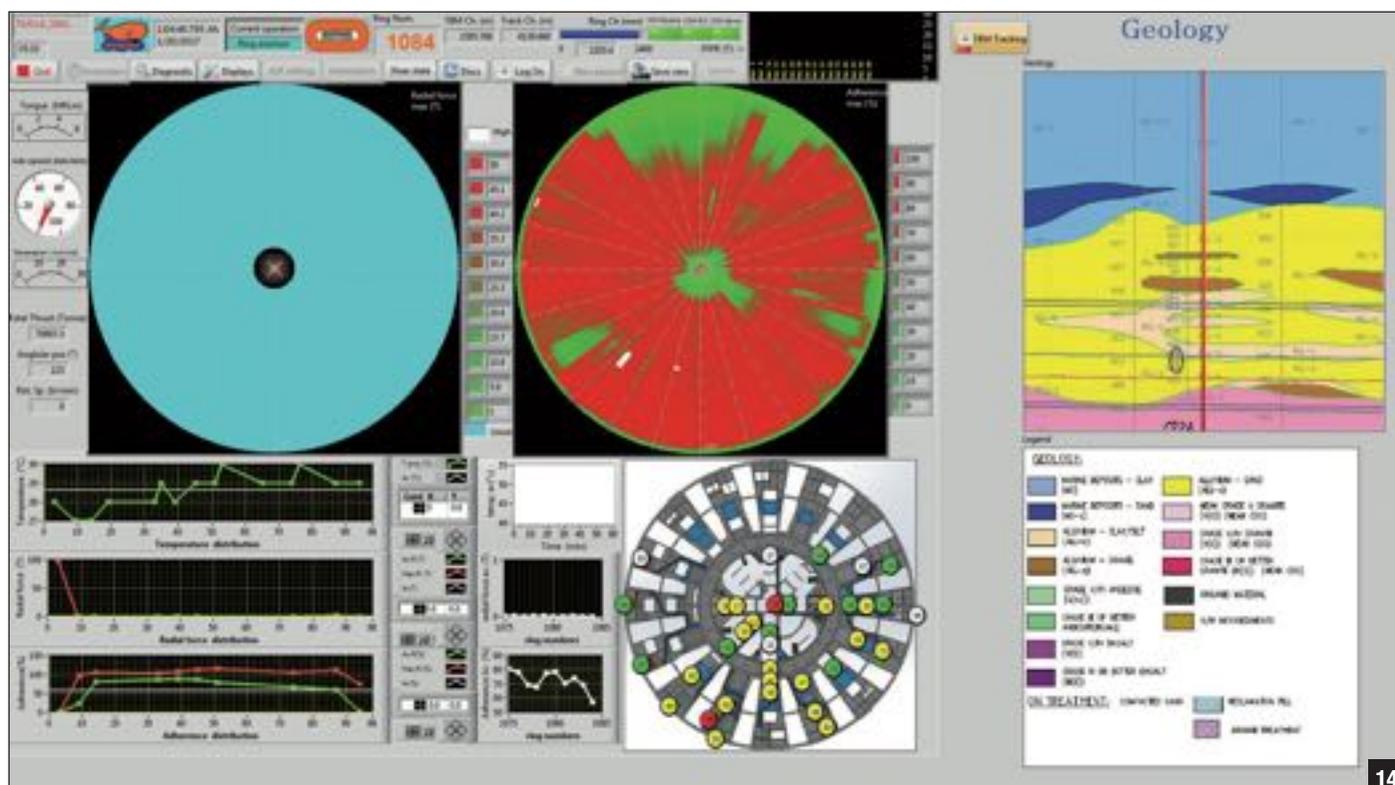
14- TMCLK Hong Kong : front non sécurisé pour une intervention hyperbare.

13- Liantang Hong Kong: detection of incipient clogging.

14- TMCLK Hong Kong: unsecured working face for a hyperbaric operation.



13



14

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

15- TMCLK Hong Kong : visualisation du niveau de roche.

16- TMCLK Hong Kong : suivi de l'usure de molettes.

15- TMCLK Hong Kong: view of rock level.

16- TMCLK Hong Kong: monitoring of disc-cutter wear.

d'usure) se remarque sur la diagraphie en adhérence. La molette tourne alors en adhérence. La molette tourne alors avec des freinages périodiques (lorsque l'écaillage rencontre le terrain). Nous en avons un exemple sur la figure 18 issue du chantier MTR703 à Hong Kong. La détection de bris de molette permet la maintenance préventive et surtout un gain de temps considérable sur la

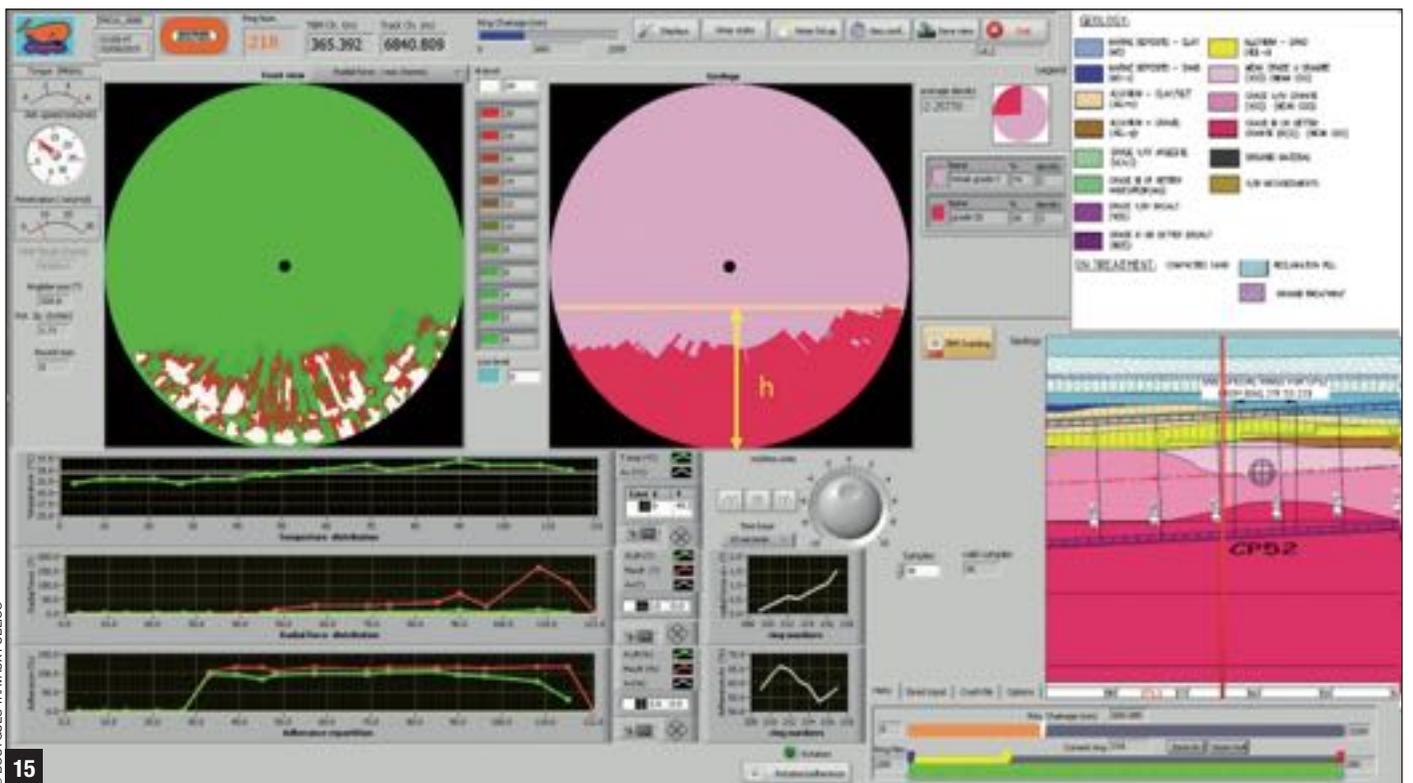
phase de contrôle manuel des disques. Ce contrôle nécessite un nettoyage ainsi qu'une rotation manuelle de la molette opérée souvent au pied de biche.

La détection des blocages de molettes

La vitesse de rotation des molettes est mesurée par le système. Il est facile de repérer une molette qui ne tourne pas

si on regarde l'exemple en figure 19 (Chantier Liantang à Hong Kong).

Dans la diagraphie en adhérence, on remarque 2 pistes (#10, #71) représentées en verts (adhérence nulle). Nous retrouvons cette information dans le graphe de distribution en adhérence également en partie inférieure. Ces deux molettes sont bloquées. ▷



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

15



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

16

La molette #71 (à la différence de la molette #10) est soumise à des efforts (80 t) et rencontre du matériau dur. Elle est plus excentrée et travaille donc beaucoup plus que la molette #10. Ces raisons expliquent la montée en température de la #71 (95°C) qui est en train de faire très rapidement un plat.

Pour la molette #10, un plat est peut-être également en formation, mais

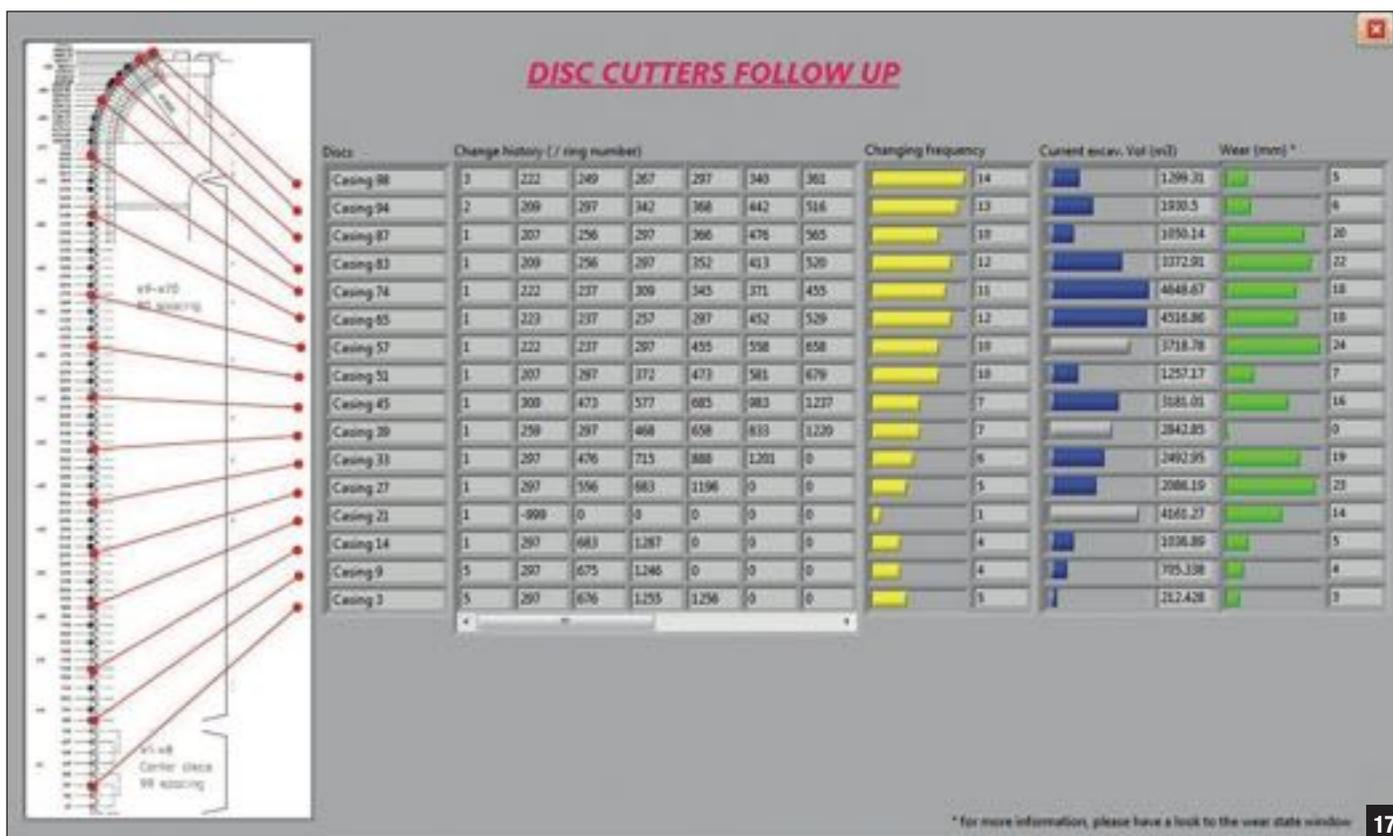
avec une vitesse beaucoup plus lente. La faible production de calories est absorbée par le marin et ne produit qu'une très légère élévation de température observable. Ces deux molettes ont été changées très rapidement par les équipes du chantier. Grâce à cette détection, suivie du remplacement rapide de la molette #71, le risque de détérioration de la tête de coupe a pu être évité.

CONCLUSION

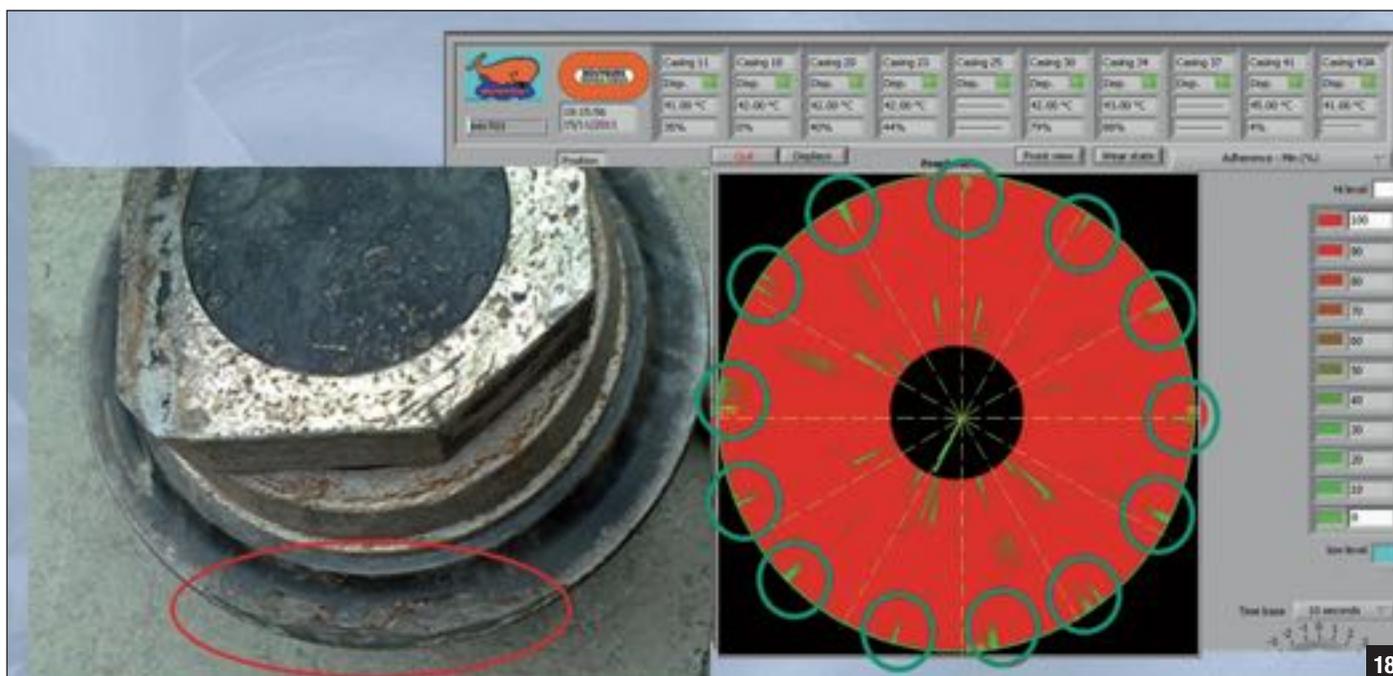
Le système Mobydic est un système abouti. Il a prouvé sa fiabilité et son utilité sur de nombreux tunneliers où la géologie rencontrée était difficile (transitions, boulders...). Le système permet d'optimiser la consommation des molettes mais surtout, limite les opérations hyperbares tout en contribuant à leur sécurisation.

17- TMCLK Hong Kong : suivi automatique des outils.
18- MTR 703 Hong Kong : détection d'écaillages sur un anneau de molette.

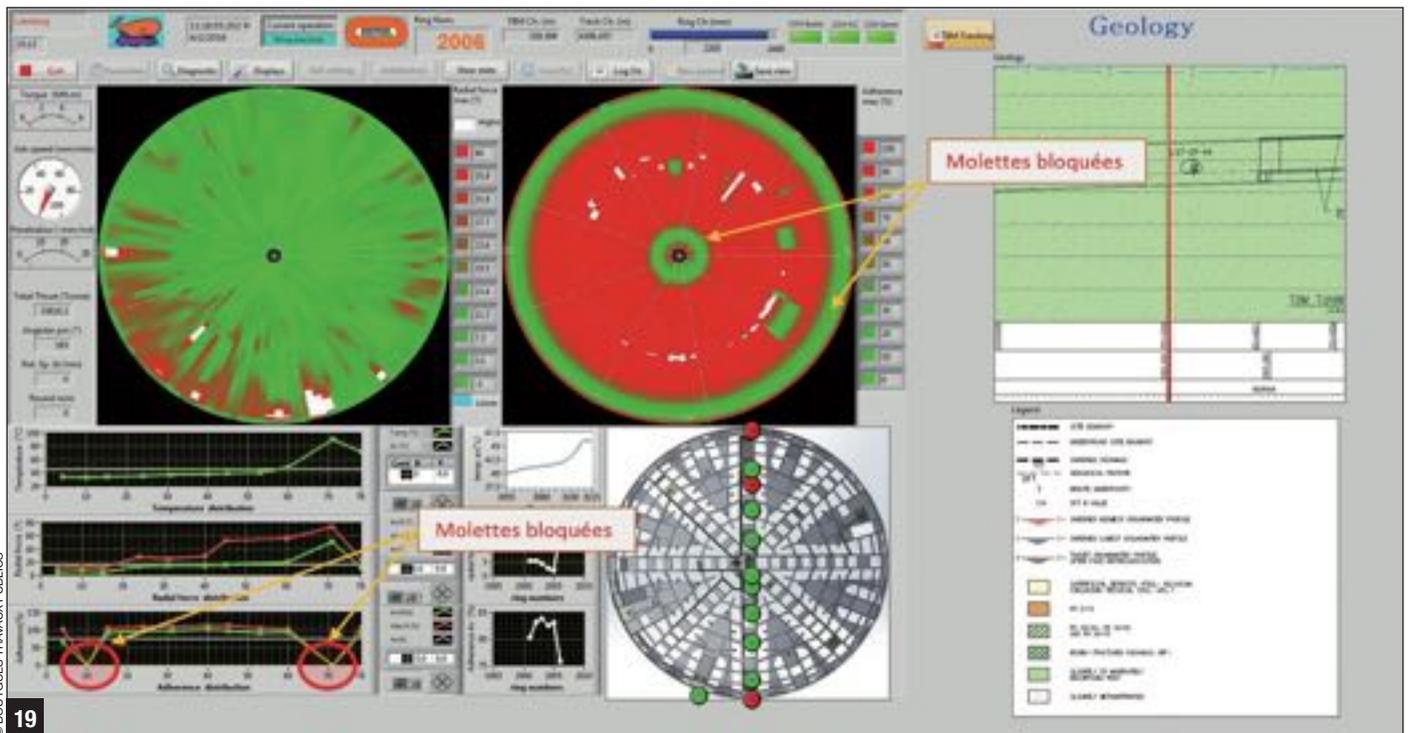
17- TMCLK Hong Kong: automatic tool monitoring.
18- MTR 703 Hong Kong: detection of chipping on a disc-cutter ring.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS



19

Mobydic diminue également les risques de dégâts sur la roue de coupe impliquant de lourdes maintenances. La connaissance de la géologie du front qu'il procure en temps réel contribue à l'optimisation des paramètres de creusement. C'est aujourd'hui un outil

19- Liantang Hong Kong : détection de molettes bloquées.

19- Liantang Hong Kong: detection of blocked disc cutters.

incontournable dans la cabine de pilotage d'un tunnelier faisant face à une géologie perturbée et à des pressions de confinement élevées. □

POUR DES FIGURES PLUS DÉTAILLÉES :
Certaines figures complexes comportent de multiples renseignements dont certains sont difficiles à déchif-

frer compte tenu de leur petit format dans l'article. Pour obtenir un meilleur format, le lecteur pourra s'adresser à l'auteur :

Pierre Moulin
Bouygues Travaux Publics - direction technique
1, avenue Eugène Freyssinet
78280 GUYANCOURT- France

p.moulin@bouygues-construction.com
+33 1 30 60 41 40.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- CHANTIER DE TMCLK (HONG KONG) – Client**
- CHANTIER DE MTR1128 (HONG KONG) – Client**
- CHANTIER DE LIANTANG (HONG KONG) – Client**
- CHANTIER DE MTR 703 (HONG KONG) – Client**
- EN CHARGE DE LA CONCEPTION, DU DÉVELOPPEMENT ET DE LA COMMERCIALISATION : Bouygues Travaux-Publics**
- EN CHARGE DE LA FABRICATION DES MOLETTES : Palmieri**

PRINCIPALES QUANTITÉS

- CHANTIER DE TMCLK (HONG KONG) : 3 TBMs (Ø 17,63 m, Ø 14 m Ø 14 m) équipés chacun respectivement de 27, 35, 35 molettes instrumentées, plus de 7 000 m excavés avec Mobydic à ce jour**
- CHANTIER DE LIANTANG (HONG KONG) : 1 TBM (Ø 14,05 m) équipé de 12 molettes instrumentées, plus de 2 400 m excavés avec Mobydic à ce jour**
- CHANTIER DE MTR 1128 (HONG KONG) : 3 TBMs (Ø 7,45 m) équipés de 9 molettes instrumentées, plus de 600 m excavés avec Mobydic à ce jour**
- CHANTIER DE MTR 703 (HONG KONG) : 1 TBMs (Ø 6,41 m) équipé de 10 molettes instrumentées, plus de 600 m excavés avec Mobydic**

ABSTRACT

MOBYDIC, THE CONTROLLER'S EYE ON THE TUNNEL FACE

PIERRE MOULIN, BOUYGUES TP

TBMs are faced with increasingly complex geologies and increasingly deep alignments, greatly increasing the confinement pressures. The risks of major damage to the cutter heads are all the more substantial, and maintenance in the working chamber is all the more difficult. Bouygues Travaux Publics, a precursor in disc cutter instrumentation, has developed the Mobydic system which makes it possible to know in real time the geological configuration of the tunnel face and the condition of the instrumented disc cutters. This system reduces the risks incurred by optimising the TBM's rate of advance and cutting-wheel maintenance. The reliability and wealth of the information that it reports make Mobydic an essential optimisation and decision aid tool. □

MOBYDIC, EL OJO DEL PILOTO EN EL FRENTE DE CORTE

PIERRE MOULIN, BOUYGUES TP

Las tuneladoras se enfrentan a geologías cada vez más complejas y a trazados cada vez más profundos que aumentan considerablemente las presiones de confinamiento. Ello incrementa notablemente los riesgos de daños importantes en los cabezales de corte, al tiempo que complica el mantenimiento en la cámara de excavación. Bouygues Travaux Publics, pionero en la instrumentación de ruedas dentadas, ha desarrollado el sistema Mobydic, que permite conocer en tiempo real la configuración de la geología en el frente de corte, así como el estado de las ruedas dentadas instrumentadas. Este sistema reduce los riesgos que genera la optimización del avance de la tuneladora y el mantenimiento del cabezal de corte. La fiabilidad y la riqueza de los datos que ofrece convierten a Mobydic en una herramienta imprescindible de optimización y ayuda para la toma de decisiones. □



1
© TRANSPORT FOR NSW

ARNCLIFFE PEDESTRIAN LINK - UN TUNNEL FORÉ À TROIS MÈTRES SOUS QUATRE VOIES FERRÉES

AUTEUR : NICOLAS LAW DE LAURISTON, ALLIANCE MANAGER, BOUYGUES TP

LE CHANTIER D'ARNCLIFFE PEDESTRIAN LINK À SYDNEY ÉTAIT A PRIORI UN PETIT CHANTIER DE TUNNEL SANS GRAND ENJEU NOUVEAU POUR LE PERSONNEL AYANT TOUT JUSTE FINI UN AUTRE TUNNEL AUX CONTRAINTES SIMILAIRES, À QUELQUES KILOMÈTRES DE LÀ. C'ÉTAIT SANS COMPTER SUR LES REBONDISSEMENTS LIÉS À LA DÉCOUVERTE, EN COURS DE CHANTIER, DE CONDITIONS GÉOLOGIQUES IMPRÉVUES, REMETTANT AINSI EN CAUSE L'ESSENTIEL DE LA PHASE PRÉPARATOIRE. PAS DE TEMPS À PERDRE POUR LES ÉQUIPES DU CHANTIER : L'OUVERTURE AU PUBLIC, SOUS DÉLAI D'UN AN, NE PEUT PAS ATTENDRE ET LA CIRCULATION DES TRAINS NE PEUT PAS ÊTRE PERTURBÉE.

LE CONTEXTE

Le Arncliffe Pedestrian Link (APL) est un projet réalisé en 2015/2016 à Sydney en Australie, dans le cadre d'un contrat en Alliance, entre un client, Transport for New South Wales, et deux constructeurs, Bouygues Travaux Publics et John Holland. Ce projet s'inscrit dans la logique d'une Alliance « Programme »,

à la suite d'un précédent projet, le North Strathfield Rail Underpass, et en parallèle d'un projet à proximité, l'Arncliffe Station Upgrade. C'est une même équipe de chantier qui réalise ces trois projets simultanément.

Les projets en Alliance ne sont pas rares en Australie, et ce modèle s'avère adapté lorsque la complexité et le pro-

1 - Tunnel à la fin du gros œuvre.

1 - Tunnel at the end of the structural work.

fil de risque sont importants, lorsque le projet n'est pas solidement défini au moment de finaliser le contrat, et lorsque la collaboration de tous les partenaires est essentielle à la bonne conduite du projet.

Le mode d'administration de ce type de contrat incite tous les participants à se concentrer sur les solutions qu'il faut

SCHÉMA GÉNÉRAL DU PROJET



© TRANSPORT FOR NSW

2

apporter aux défis rencontrés, plutôt que sur les responsabilités des uns et des autres. Tous les risques sont partagés entre le client et les constructeurs, à l'exception de ceux explicitement exclus avant la signature du contrat. L'APL consiste en un tunnel piétonnier de 35 m de long, foré sous 3 m de couverture sous quatre voies ferrées pour fret et passagers en opération (figure 2), à travers un talus en remblais. Les campagnes géologiques ont montré que le remblai était principalement constitué de sable.

La commune d'Arncliffe étant sur un axe ferroviaire majeur, la solution de tunnel foré était principalement choisie de façon à ne pas interrompre la circulation. Le tunnel est à proximité d'un pont existant classé au patrimoine du New South Wales et d'une école. Son but principal est de permettre de passer d'un côté du talus ferroviaire à l'autre de façon sécurisée, notamment pour les écoliers, en évitant un raccourci dangereux par la route sous le pont. En effet celle-ci ne comporte pas de trottoir et comporte un virage serré avec une faible visibilité.

Le montant de ce contrat est de 15 millions de dollars australiens, avec un démarrage en avril 2015, et une ouver-

2- Schéma général du projet.

2-General diagram of the project.

ture prévue au public en juillet 2016. Les études techniques ont abouti à une solution consistant en une voûte parapluie de soutènement temporaire constituée de tubes métalliques de 450 mm de diamètre, contigus, avec des connecteurs male-femelle. À cela s'ajoute une série de cintres en acier espacés de 1 m.

Le soutènement permanent est constitué d'une épaisseur de 350 mm de béton armé sur les murs, connectée à une dalle de béton armé d'épaisseur variable (figure 3). La méthode de construction du gros œuvre se résume ainsi :

- Tapisage des pentes du talus (à 35 degrés) par du béton projeté, stabilisé par des clous de 3 m de long ;
- Forage des tubes de la voûte parapluie un à un, sur toute la longueur du futur tunnel. Le premier tube au

sommet de la voûte est installé au moyen d'un micro-tunnelier avec guidage laser afin de contrôler son alignement, essentiel pour l'alignement de tous les futurs tubes. Les autres tubes sont forés par deux machines de forage sans guidage, et l'alignement est assuré par le fait que la prise male du tube à forer coulisse dans la prise femelle du tube précédent ;

- Une fois les tubes formant la voûte mis en place, ils sont remplis de béton et connectés entre eux à chaque extrémité par une voûte en béton projeté ;
- Des goujons en fibre de verre sont installés depuis chaque extrémité pour assurer la stabilité de la face pendant la phase d'excavation ;
- Le tunnel est alors excavé par cycles de 1 m : excavation à la pelle mécanique, béton projeté sur la face, installation du cintre sur cales, coulage de dalle inférieure ;
- Une fois l'excavation terminée, projection de béton sur les murs et installation d'une membrane drainante ;
- Enfin, coulage du soutènement permanent en béton armé in situ, dans le tunnel et sur les entrées inclinées.

LA SURPRISE GÉOLOGIQUE

Le défrichage des pentes du talus a été rapidement exécuté dès l'équipe mobilisée, afin de donner accès aux engins de forage. Alors que les équipes commençaient les premières opérations de forage horizontal des clous de stabilisation des pentes en juin 2015, à distance des voies ferroviaires, les volumes de coulis de scellement injectés se sont révélés supérieurs aux volumes prévus. De légers affaissements localisés se sont manifestés près de la surface inclinée, laissant apparaître des cavités dans le terrain. De toute évidence le sol près de la surface n'était pas sableux mais plutôt constitué d'un amas de blocs de grès sans particules fines entre eux.

Les travaux ont donc été stoppés afin d'analyser la situation pour garantir la sécurité des opérations.

Des forages de reconnaissance horizontaux ont été entrepris sur 12 m de long et, comme la technique ne permettait pas de récupérer des échantillons intacts, les paramètres de forage ont été enregistrés, tout en décrivant la nature du matériau extrait ainsi que le mode de pénétration (continu, saccadé, rapide, lent, etc.). C'est alors qu'il s'est avéré que le matériau sur les 6 à 7 m extérieurs du talus, de chaque côté, était très différent du matériau du cœur, et constitué généralement de blocs de grès de taille variable entre 100 mm et 500 mm, avec relativement peu de remplissage fin.

La compacité et l'équilibre de l'ensemble étaient principalement le résultat du passage des trains pendant près de 100 ans. En investiguant de plus près l'histoire de la construction ferroviaire à cet endroit et en recoupant des témoignages sur les méthodes de construction du début du XX^e siècle il est apparu que les deux lignes centrales avaient été construites dans un premier temps, en créant un remblai en sable, depuis le niveau naturel, à la fin du XIX^e siècle. Puis, au cours du premier quart du XX^e siècle, selon toute vraisemblance, les deux lignes extérieures ont été ajoutées, et le talus élargi en déversant latéralement des déblais depuis des wagons roulant sur les voies existantes.

Les déblais provenaient probablement de la section en tranchée élargie pour ce même projet de quadruplication et seulement 1 km plus loin. Aucun des rapports géotechniques faits par les différents consultants avant le début de la phase de construction n'avait identifié l'hétérogénéité du remblai (figure 4). ▷

3- Section et élévation structurales du tunnel.

4- Section géologique du tunnel.

3- Structural cross section and elevation view of the tunnel.

4- Geological cross section of the tunnel.

La méthode d'installation de la voûte parapluie prévue initialement n'était donc plus appropriée à ce profil de sol hétérogène sur la longueur d'un tube (une zone périphérique très poreuse et sujette à éboulements et une zone centrale généralement sableuse). Le risque géologique, comme la grande majorité des risques, étant partagé entre le client et les constructeurs, il n'y a pas eu de temps perdu dans des négociations d'ordre commercial et toutes les forces ont été mobilisées immédiatement pour résoudre le problème.

LES SOLUTIONS IMPLÉMENTÉES

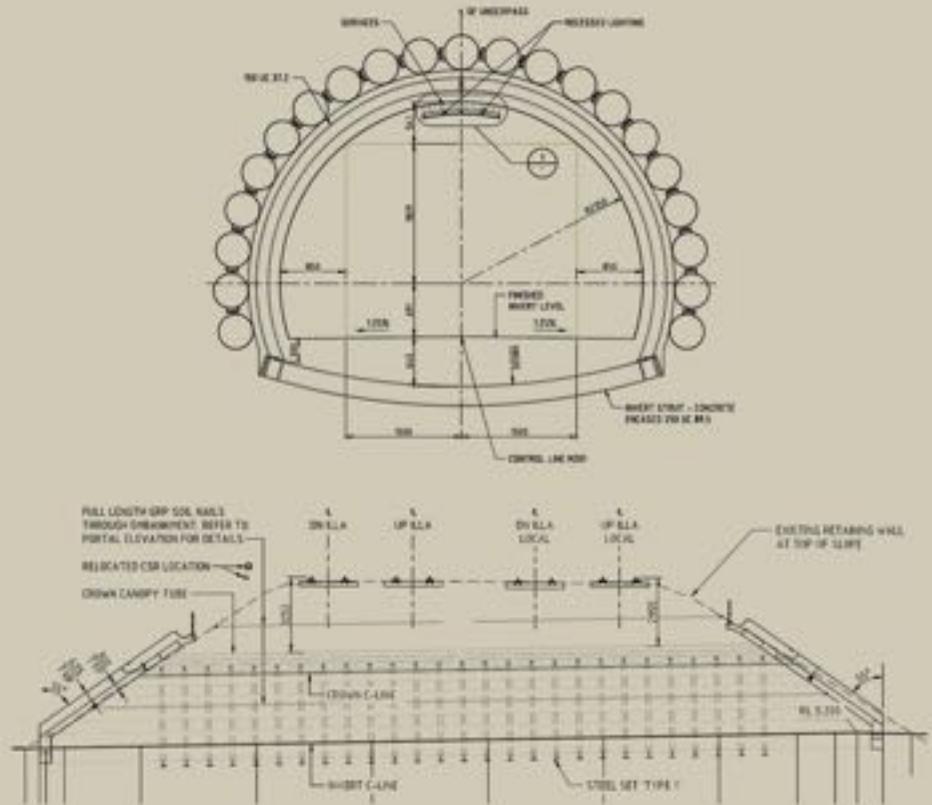
Après une remise à plat de différentes options, nous avons décidé d'injecter le sol sur les 6 à 8 premiers mètres avec du coulis de ciment de 3-5 MPa et de reprendre ensuite l'installation des tubes de la voûte parapluie.

Afin de minimiser les coûts, des tubes PVC avec des fentes régulièrement espacées ont été installés dans des trous forés de 90 mm de diamètre, et remplis de coulis. 500 m³ de coulis ont été nécessaires pour remplir les interstices et ainsi minimiser les risques d'éboulement et de fontis lors de la phase ultérieure (sachant que le volume de l'excavation du tunnel représente environ 800 m³) (figure 5).

L'installation des tubes de la voûte parapluie pouvait commencer, avec un retard de 2 mois sur le planning initial. La machine de forage étant en principe plutôt prévue pour des sols homogènes et meubles, l'insertion des tubes dans le sol s'est révélée laborieuse et les foreuses ont été poussées à leur limite.

Les principales difficultés rencontrées ont été la déformation des tubes (6 mm d'épaisseur), l'endommagement de certains connecteurs male-femelle, et des forces de poussage importantes. Une fois la voûte de tubes sur la partie supérieure et quasi-horizontale achevée, une nouvelle étude complète du

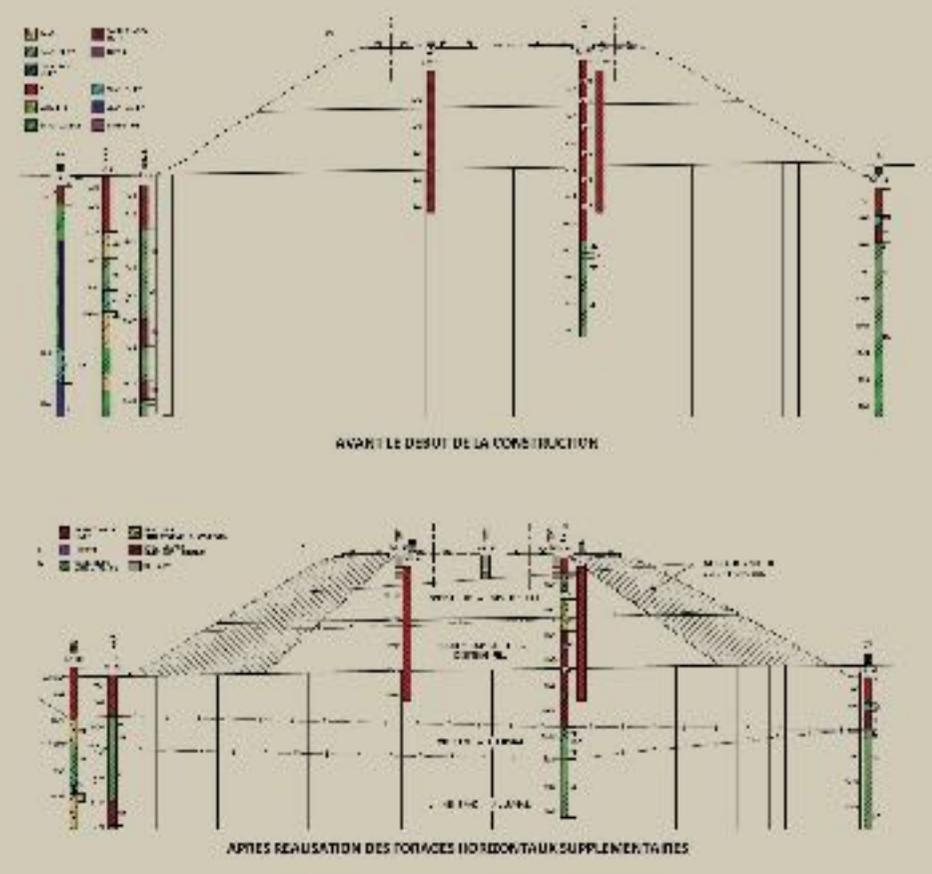
SECTION ET ÉLÉVATION STRUCTURELLES DU TUNNEL



3

© TRANSPORT FOR NSW

SECTION GÉOLOGIQUE DU TUNNEL



4

© TRANSPORT FOR NSW



5



6



7



8



9



10

tunnel et de sa méthode d'excavation démontrait qu'il était possible d'enlever les connecteurs inter-tubes pour les tubes restants en partie inférieure. C'est ainsi que de nouveaux tubes, sans connecteurs et plus épais (12 mm), ont été fabriqués et mis en place dans le talus.

Le guidage du tube se faisait en contrôlant avec précision tous les paramètres de forage en fonction du type de matériau rencontré. Cette optimisation a immédiatement permis d'atteindre une meilleure productivité et de réduire le nombre total de tubes (figure 6).

Compte-tenu de l'expérience acquise dans le forage de tubes de petits diamètres (pour les injections et les investigations notamment), et afin de satisfaire les besoins du programme, les tiges de stabilisation de face ont été forées en parallèle de la voûte parapluie, depuis l'autre côté du talus et sur toute sa largeur.

Comme la voûte parapluie a été terminée fin février 2016 avec un retard de 5 mois, cette optimisation a permis de rattraper plus d'un mois. Il ne restait alors plus que 5 mois avant l'ouverture du tunnel et l'excavation n'avait pas commencé.

5- Opération d'injection de coulis de remplissage.

6- Installation de la voûte parapluie.

7- Percement du tunnel.

8- Tunnel en cours d'excavation.

9- Coffrage du soutènement permanent.

10- Tunnel le jour de sa mise en service.

5- Filling cement grouting operation.

6- Installing the umbrella arch.

7- Tunnel driving.

8- Tunnel during excavation.

9- Formwork of permanent retaining structure.

10- Tunnel on the day of its commissioning.

L'équipe a engagé un nouveau sous-traitant spécialiste, Tunnelling Solutions, pour effectuer l'excavation et le soutènement permanent du tunnel. La planification détaillée de cette nouvelle phase a été entreprise pendant la phase de forage de la voûte parapluie, ce qui a permis à la nouvelle équipe de se mobiliser immédiatement après le bétonnage des tubes.

Les tubes de la partie inférieure de la voûte parapluie n'étant plus contigus, il fallait désormais gérer le risque lié à l'exposition du sol meuble entre les tubes, notamment au cœur du talus, là où il y avait peu de coulis de remplissage.

De nombreux scénarii d'incidents potentiels ont été envisagés, des mesures de contrôle préventives appliquées et des mesures correctives planifiées.

Le cycle d'excavation a été modifié de la manière suivante :

- Excavation de 1 m à la pelle mécanique sur la moitié supérieure de la face, en commençant par la partie supérieure sous les tubes contigus et en descendant progressivement ;
- Béton projeté de sécurité sur la voûte, les murs et la face ;

→ Excavation de la moitié inférieure de la face ;

→ Béton projeté de sécurité sur la partie restante ;

→ Installation de la partie inférieure du cintre sur cales temporaires ;

→ Boulonnage des 2 cintres de voûte sur la base ;

→ Coulage de la dalle inférieure ;

→ Béton projeté des murs jusqu'à la face extérieure du cintre de façon à garantir le contact.

Ce processus d'excavation se révéla un véritable succès, avec un avancement d'un mètre par jour, soit près du double de l'avancement prévisionnel en début de chantier.

Les 38 m de tunnel ont été excavés en moins de 8 semaines, récupérant ainsi davantage sur le programme (figures 7 et 8).

Les tassements à la surface et les déformations des rails ont été suivis de près grâce à un système automatique de relevés de points en temps réel, 24h sur 24, doublé d'une vérification visuelle quotidienne par un expert en stabilité des voies ferroviaires.

Les déformations constatées ont été négligeables pendant toute la phase d'excavation.



11
© TRANSPORT FOR NSW

Pendant la phase d'excavation l'équipe s'est attelée à planifier en détail toutes les activités ultérieures, et a continué, en collaboration étroite avec le client, la collectivité locale et les bureaux d'études, à optimiser la conception et les contrats de sous-traitance afin de toujours offrir plus de valeur au client. C'est ainsi que toutes les équipes du chantier ont contribué, au-delà de leur rôle initial et grâce à leur expérience de planification des mois précédents, au succès du déroulement de tous les travaux de second œuvre. Il n'aura fallu que 3 mois entre le percement du tunnel et l'ouverture au public en présence des élus locaux. Pendant cette courte période, les équi-

11- Fresque conçue conjointement par les écoliers locaux et des artistes de « street art ».
12- L'équipe au complet le jour de l'ouverture.

11- Fresco designed jointly by local schoolchildren and street artists.
12- The full team on the opening day.

pes ont réalisé le soutènement et le radier permanents du tunnel, les arches inclinées elliptiques aux extrémités du tunnel, les voies d'accès piétonnes, les équipements d'éclairage, l'installation des caméras de surveillance, les modifications des deux routes adjacentes, les clôtures et garde-corps de sécurité,

une fresque artistique sur les murs du tunnel, la peinture des surfaces en béton extérieures, le drainage et les aménagements paysagers, et la démobilité du site (figures 1, 9 et 10). Le 27 juillet 2016, le tunnel est ouvert au public, le jour initialement prévu dans le contrat, et à la satisfaction de toutes les parties prenantes du projet. Le retard, accumulé à hauteur de cinq mois, avait été entièrement rattrapé. Grâce au contrat de type Alliance, à la confiance en toutes circonstances entre les équipes de chantier et le client, à la persévérance des ingénieurs pour optimiser les études et la mise en œuvre tout au long du projet, et malgré les nombreux événements imprévus, il n'y a eu aucune variation sur le contrat et le budget initial a été respecté (figures 11 et 12). □

PRINCIPALES QUANTITÉS

MONTANT DU CONTRAT DE CONCEPTION-CONSTRUCTION : 15,1 millions de AU\$
LONGUEUR DU TUNNEL AU SOL : 38 m
LONGUEUR TOTALE DES TUBES DE LA VOÛTE PARAPLUIE : 600 m
QUANTITÉ DE COULIS DE REMPLISSAGE INJECTÉ : 500 m³
QUANTITÉ DE MATÉRIAU EXCAVÉ À L'INTÉRIEUR DU TUNNEL : 800 m³
NOMBRE D'INTERRUPTIONS DE LA CIRCULATION DES TRAINS : 0

PRINCIPAUX INTERVENANTS

CLIENT : Transport for New South Wales
GROUPEMENT EN CHARGE DE LA CONCEPTION-CONSTRUCTION : Bouygues Travaux-Publics - John Holland
BUREAU D'ÉTUDES EN CHARGE DE LA CONCEPTION : Smec
BUREAU D'ÉTUDES EN CHARGE DE LA REVUE INDÉPENDANTE DE LA CONCEPTION : Mott Macdonald
SOUS-TRAITANT EN CHARGE DE L'EXCAVATION DU TUNNEL : Tunnelling Solutions
SOUS-TRAITANT EN CHARGE DU GÉNIE CIVIL DE PART ET D'AUTRE DU TUNNEL : Ford Civil



© TRANSPORT FOR NSW

12

ABSTRACT

ARNCLIFFE PEDESTRIAN LINK - A TUNNEL BORED THREE METRES BELOW FOUR RAILWAY LINES

NICOLAS LAW DE LAURISTON, BOUYGUES TP

The construction of the Arncliffe pedestrian tunnel represented a technical challenge in itself: a 15-month schedule, little roof covering under four railway lines in operation without a pause, little space to work in and little geological information available at the start of the project. The discovery of different geological conditions after completing the design and deploying the equipment and personnel constituted a challenge on a quite different scale, faced with the constraint of a fixed commissioning date. The courage, innovativeness, collaboration and perseverance of all the project players made it possible to deliver the tunnel right on time, without a hitch, and with impeccable quality of execution. □

ARNCLIFFE PEDESTRIAN LINK - UN TÚNEL PERFORADO A TRES METROS DEBAJO DE CUATRO VÍAS FÉRREAS

NICOLAS LAW DE LAURISTON, BOUYGUES TP

La construcción del túnel peatonal de Arncliffe constituía en sí misma un desafío técnico: programa de 15 meses, escasa cobertura debajo de cuatro vías férreas operativas y sin interrupción, poco espacio para trabajar y poca información geológica disponible al inicio de la obra. Descubrir condiciones geológicas diferentes al término del diseño y una vez movilizados los equipos ha supuesto un reto de gran envergadura, con una fecha límite de puesta en servicio inamovible. El valor, el espíritu innovador y colaborativo, y la perseverancia de todos los actores del proyecto han permitido entregar el túnel con arreglo al calendario, sin accidentes y con una calidad de ejecución irreprochable. □



**Résoudre
votre problématique
de sol & de construction**

Fondations profondes
Soutènements
Ecrans étanches
Reprises en sous-œuvre
Réhabilitations d'ouvrages
Comblements de cavités
Traitements de terrains
Améliorations de sols
Ancrages
Fouilles clés en main

Partenaire-expert

www.spiefondations.com

/ Spie fondations

spie batignolles

Prolongement d'EOLE à l'ouest / Gare de la Défense et tunnels adjacents

BUILD ON US



www.soletanche-bachy.com

→ **Intervenant partout dans le monde pour le compte de clients publics ou privés, Soletanche Bachy s'attache à proposer les meilleures solutions techniques et contractuelles** : elle apporte aussi bien des compétences polyvalentes d'ensemblier dans le cadre de grands projets d'infrastructures, que celles de spécialiste maîtrisant l'ensemble des procédés de géotechnique, de fondations spéciales, de travaux souterrains, d'amélioration et de dépollution des sols.



| **Prolongement Nord de la ligne 14, lot 2 - Ile-de-France | FRANCE |**
Station Mairie de Saint-Ouen - nouvelle Hydrofraise® à grippers
(Prix de l'innovation FNTP 2016 - Processus matériels).



SOLETANCHE BACHY