

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

TRAVAUX SOUTERRAINS. PROLONGEMENT D'EOLE. DERIVATION DU GRAND TUNNEL DU CHAMBON. POUR UNE GESTION EFFICACE DES RISQUES RESIDUELS EN TRAVAUX SOUTERRAINS. GALERIE D'ALIMENTATION EN EAU BRUTE DES JANOTS. TENUE AU FEU DES VOUSOIRS DE TUNNEL. LIGNE 11 : PUIITS ET GALERIE D'ESSAIS GEOTECHNIQUES CALMETTE. LABORATOIRE DE RECHERCHE DE L'ANDRA A BURE. MISE AUX NORMES DU TUNNEL DU CHAT EN SAVOIE

N°939 JANVIER/FÉVRIER 2018



LIGNE OUEST-EST DU
TRAMWAY DE NICE
© YVES CHANOÏT





SEFI-INTRAFOR

NOS FONDATIONS AUJOURD'HUI, CE SONT EUX

**NOS FONDATIONS
DE DEMAIN,
C'EST PEUT-ÊTRE
VOUS !**

REJOIGNEZ-NOUS POUR LE GRAND PARIS

[FONDATIONS.FAYAT.COM/CARRIERES](https://fondations.fayat.com/cARRIERES)



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**
Pierre Aristaghes (Bouygues tp), Erica Calatozzo (Systra), Jean-Bernard Datry (Setec tpi), Philippe Gotteland (Fnfp), Jean-Christophe Goux-Reverchon (Fnfp), Florent Imberty (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 (actualités),
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.frFrance (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**Directeur de clientèle**
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04
b.cosson@rive-media.fr**Site internet : www.revue-travaux.com****Édition déléguée**
Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
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).

Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0218 T 80259
ISSN 0041-1906

L'ART DE CONSTRUIRE LES TUNNELS ÉVOLUE



© DR

La revue *Travaux* consacre ce numéro aux travaux souterrains qui demeurent dans le domaine du génie civil des ouvrages singuliers. Les principaux traits de cette singularité sont les suivants :

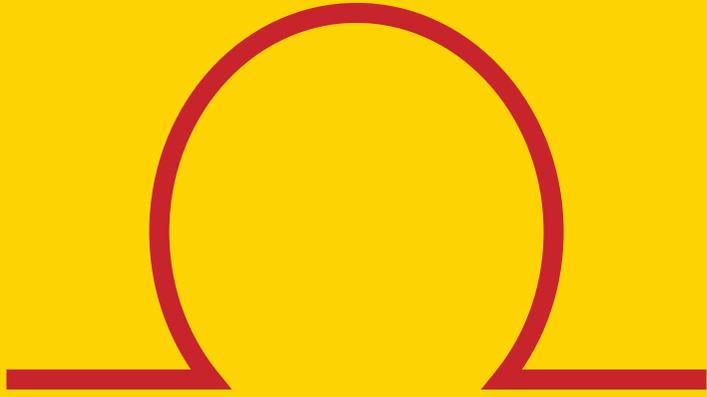
- L'interaction entre le sol et les ouvrages souterrains est totale alors que pour les superstructures le sol ne constitue qu'une condition aux limites traitée par les fondations.
- Les difficultés pour appréhender correctement cette interaction ont longtemps conduit les meilleurs spécialistes à considérer que les structures souterraines échappaient à la rationalité du calcul et que le dimensionnement des soutènements et revêtements relevait de démarches empiriques. À cet égard, grâce à la modélisation numérique qui a permis de prendre en compte le caractère tridimensionnel du creusement d'un tunnel, nul ne songerait dorénavant à faire un projet de tunnel sans faire appel à un modèle pour le dimensionner. Les résultats des modèles doivent cependant être soumis à une analyse critique des hypothèses faites et des inévitables incertitudes sur les données.
- Les techniques de creusement des tunnels ont considérablement évolué. Aux méthodes conventionnelles qui ont pourtant connu de grandes améliorations se substitue de plus en plus le creusement avec des tunneliers. Aux premiers tunneliers au rocher qui pouvaient concurrencer,

dans les cas favorables, l'abattage à l'explosif, ont succédé des tunneliers complexes assurant, par une pression de confinement, la stabilité du front de taille et la mise en place d'un soutènement par anneaux de voussoirs préfabriqués. On peut alors atteindre des vitesses d'avancement élevées. Cependant, dans des terrains très difficiles donnant des convergences très fortes ou des venues d'eau sous forte pression, le recours aux méthodes conventionnelles demeure nécessaire.

- Tous ces progrès n'empêchent pas de considérer encore et souvent de manière excessive que les coûts et les délais de construction des tunnels sont mal maîtrisés. Les dépassements constatés sont dans la grande majorité des cas attribués à des « conditions imprévues » qui sont la base des réclamations des entreprises. L'introduction dans les clauses du marché d'un mémoire de synthèse géologique et géotechnique a permis d'objectiver les bases contractuelles de ces réclamations. Les analyses de risques sont également de nature à constituer un progrès dans la mesure où un caractère purement formel ne se substitue pas à la véritable responsabilité.
- On constate actuellement un fort développement des travaux souterrains en site urbain notamment pour améliorer la mobilité dans les villes. Ces travaux en général peu profonds ont leur spécificité propre pour respecter l'environnement local et en particulier éviter de provoquer des désordres en surface : tassements, fontis, etc. L'utilisation de tunneliers à pression de confinement constitue un progrès majeur ; toutefois, des exemples d'incidents récents montrent que des risques lourds de conséquences ne sont pas toujours totalement maîtrisés.

Le volumineux programme à venir des travaux souterrains en France constitue un réel défi pour toute la profession dont les donneurs d'ordre doivent véritablement prendre conscience. Des investissements importants et des actions de formation soutenues paraissent indispensables pour y faire face.

MARC PANET
CONSULTANT
MEMBRE FONDATEUR DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES



TRAVAUX SOUTERRAINS

MISE AUX NORMES DU TUNNEL DU CHAT © ACTOPHOTO





04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



14

**ENTRETIEN AVEC
BERTRAND BURTSCHELL**
DES MÉTIERS MULTIPLES
SOUS UNE SEULE MARQUE

20 ENTRETIEN AVEC YANN LEBLAIS : INTÉGRER
LE DESSUS ET LE DESSOUS DE LA VILLE

24 MS : PRÉSERVER L'EAU DANS TOUTES
SES UTILISATIONS



32

**PROLONGEMENT
D'ÉOLE**

Construire l'avenir
au cœur de la ville



40

**DÉRIVATION
DU GRAND TUNNEL
DU CHAMBON**

5 mois pour délivrer une vallée



48

**POUR UNE GESTION
EFFICACE DES RISQUES
RÉSIDUELS**

en travaux souterrains



54

GALERIE DES JANOTS

Acheminement d'eau de la Durance
entre les communes de Cassis
et de La-Ciotat (13)



62

**TENUE AU FEU DES
VOUSSOIRS DE TUNNEL**

Importance et impact
de l'écaillage



68

**LIGNE 11 DE LA RATP
AUX LILAS**

Puits et galerie d'essais
géotechniques Calmette



74

**LABORATOIRE DE
RECHERCHE DE L'ANDRA**

Eiffage génie civil réalise
des galeries à -500 m à Bure



80

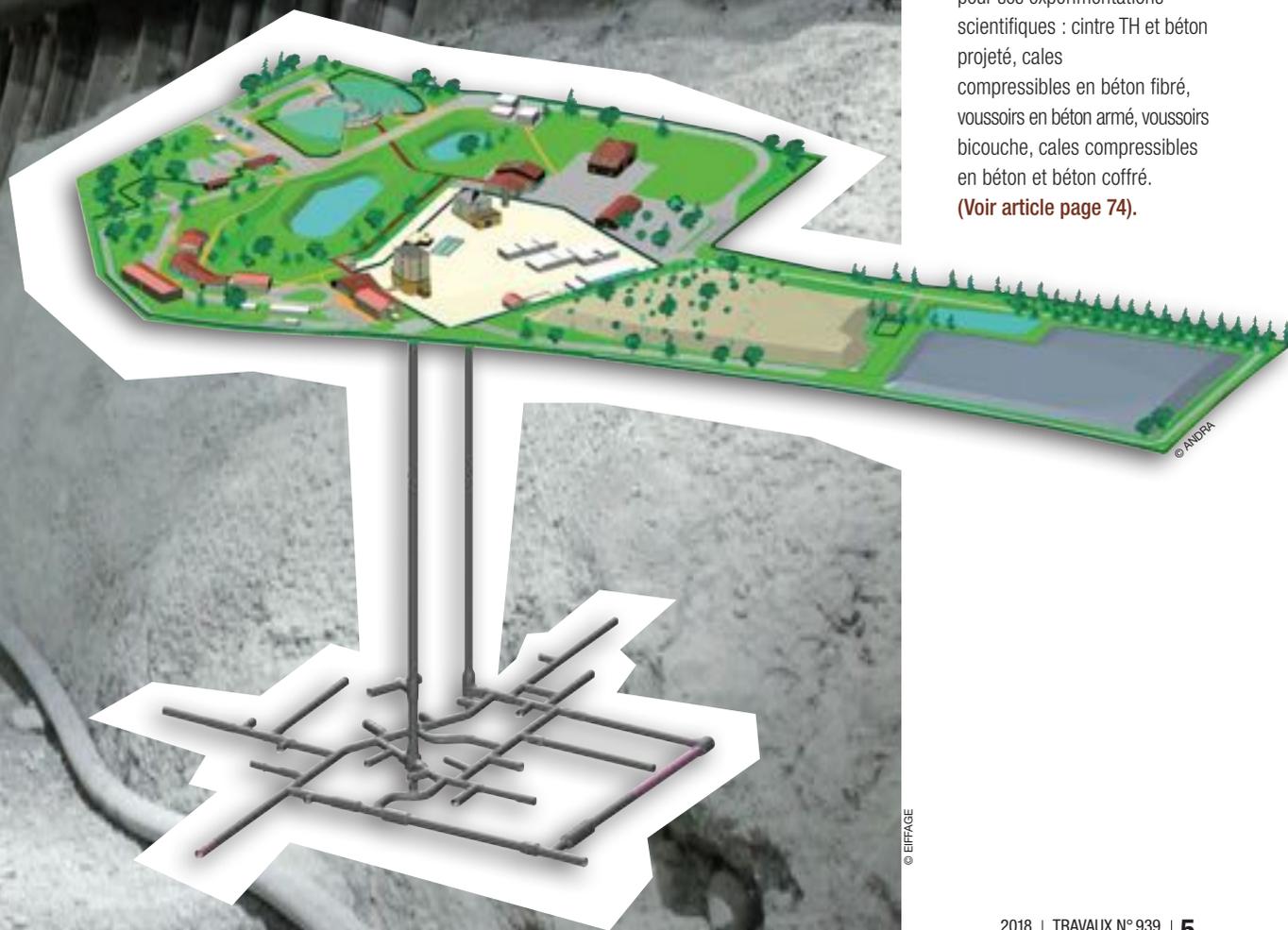
**TUNNEL
DU CHAT**

Mise aux normes



UN LABORATOIRE À 500 m DE PROFONDEUR À BURE

EIFFAGE creuse pour l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) à Bure, dans le département de la Meuse, un réseau de galeries destiné à étudier la faisabilité du stockage de déchets nucléaires à vie longue, dans les argilites, à grande profondeur. Trois méthodes de perforation sont pratiquées : pelle Brokk avec brise-roche, machine à attaque ponctuelle Eickoff et tunnelier à attaque ponctuelle Herrenknecht. Le soutènement est réalisé de cinq façons différentes, non pour des raisons géologiques, mais à la demande de l'Andra pour ses expérimentations scientifiques : cintre TH et béton projeté, cales compressibles en béton fibré, voussoirs en béton armé, voussoirs bicouche, cales compressibles en béton et béton coffré. (Voir article page 74).



COMMENT OCCUPER DAVANTAGE LE SOUS-SOL

Les nouveaux espaces souterrains dont il a été question au congrès de l'Aftes répondent aux besoins humains de lumière et de connexions avec l'extérieur.



Intérieur du Musée précolombien de Santiago du Chili éclairé par la lumière du jour.

« La tendance est de faire du sous-sol des zones de services (eau, énergie, etc.). Or, nous pourrions y réintroduire des éléments qui ont été sortis de la ville comme l'industrie et la logistique. » a proposé Monique Labbé, présidente du comité Espace souterrain de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain (Aftes), en introduction des 9 interventions sur les nouvelles générations d'espaces souterrains, au congrès de l'Aftes, mi-novembre.

Que pouvons-nous loger en sous-sol, là où le soleil pénètre moins voire pas du tout ?

La présence de salariés est déterminante selon Ray Sterling (États-Unis) qui a présenté des retours d'expériences des années 1960-1970.

« Les études sur les impacts physiologiques et psychologiques des espaces

souterrains manquent, » constate-t-il. La Bibliothèque Walker à Minneapolis (Minnesota) avait été construite sur un site exigu. La cour intérieure qui longeait la rue recevait des débris. L'exiguïté des lieux, le manque de vue, les murs en béton, les canalisations visibles, la température mal contrôlée ont eu raison du bâtiment, reconstruit en 2014.

Au Civil Engineering Building (université du Minnesota), les dispositifs mécaniques pour faire entrer la lumière du jour sont difficiles à entretenir. L'entrée en pente s'encombre de feuilles mortes ou de neige. Il faut beaucoup ventiler et l'eau doit être pompée en permanence. En revanche, les performances énergétiques sont bonnes.

À Sheffield (Angleterre), un passage piéton sous un carrefour, éclairé par une lentille, était emprunté couramment

jusqu'à ce que la ville dépérisse et que l'endroit, mal famé, ferme. « Il est difficile de démolir un espace souterrain, a souligné Ray Sterling. Il faut penser à leur adaptabilité dans le temps. Il ne faut pas faire un espace souterrain en cul-de-sac. »

→ Favoriser un large éventail de fonctions

La connexion des espaces est une des recommandations du projet national Villes 10D (2012, ANR), leur animation, aussi. « Il faut y favoriser la multifonctionnalité, a insisté Jean-Pierre Palisse, représentant de l'Irex⁽¹⁾ dans le projet. Le futur espace s'intégrera dans un projet urbain plus large et les acteurs seront concertés bien en amont. Toutes les dimensions de la ville y auront leur place. Le sous-sol ne figure pas encore dans les documents d'urbanisme. L'espace souterrain sera rendu attractif. Les volumes généreux atténuent la sensation d'écrasement. Penser à l'éclairage, en particulier le naturel, à l'ambiance sonore qui sécurise et à la végétation. »

« La couleur peut mettre en valeur un axe, a complété Larissa Noury, architecte coloriste. Elle contribue au ressenti psychologique. Il faut rechercher une harmonie. L'assemblage avec l'éclairage et les matériaux participe à l'image de la ville, fait un lien avec l'extérieur et avec le passé. »

→ Carrière aménagée en hôtel

La sécurité incendie des espaces souterrains est cruciale. La réglementation n'est pas spécifiquement vue sous l'angle du sous-sol, selon Monique Labbé. Ville 10D travaille sur ce thème avec les services concernés. C'est un des risques les plus importants du projet

d'hôtel envisagé dans une carrière à Paris par les élèves ingénieurs de l'École des mines de Nancy (Meurthe-et-Moselle) avec Georesources. La Carrière de la Brasserie (Paris 12^e), du type chambres et piliers, descend à 15-20 m de profondeur, l'air y est à 15°C mais humide. Une vingtaine de chambres peuvent y loger. Le risque incendie est élevé pendant la construction. Il faut trouver des sorties de secours et la réglementation peut évoluer.

Santiago du Chili a choisi de densifier la ville par le sous-sol. Le centre-ville accueille 1,5 million de personnes chaque jour. Le maillage des passages dans les îlots se dédouble sous terre avec les couloirs de métro reliés à des galeries commerciales et culturelles. Les espaces semi-enterrés du Musée précolombien et des gares Mapocho et Quinta Normal sont éclairés par la lumière naturelle.

→ Penser aux aspects juridiques

« La ville cherche à faire converger les espaces, à relier en sous-sol des bâtiments voisins (non accolés), explique Francisco Schmidt, architecte. Il faut aussi développer les connexions juridiques. Les servitudes des paseos peuvent être répétées en sous-sol. Il peut y avoir échange d'espaces publics. On peut penser à des concessions. »

À Cracovie (Pologne), le nouveau Musée de Silésie est logé sous terre avec des puits de lumière. Des bâtiments de la mine, fermée en 1999, ont été conservés, et leurs fondations, renforcées par micropieux. Un bâtiment a été creusé sur trois niveaux en sous-sol. ■

⁽¹⁾ Irex : Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil.

LA RATP RECONSTRUIT SES DÉPÔTS SUR EUX-MÊMES

La Régie autonome des transports parisiens (RATP) modernise ces centres de maintenance et dépôts de bus, notamment à cause du passage à l'électricité de tous les véhicules en 2025. À cette occasion, elle les enterre et construit au-dessus. La commercialisation de bureaux, parkings, logements, etc. financent 80% des travaux. Les ateliers Jourdan-Corentin-Issore à Paris 14^e, ont été inaugurés en novembre (183 places de remisage de bus, 660 logements, crèche, halte-garderie, jardins suspen-

du). Prévue pour 2026 : la transformation du centre Vaugirard (Paris 15^e). Christophe Lamontre, responsable valorisation et administration du domaine à la Régie, a parlé, au congrès 2017 de l'Aftes (cf. ci-dessus), de la modernisation du dépôt de la rue de Lagny à Paris 20^e, en partie rouvert fin 2015. La maintenance est logée au rez-de-chaussée semi-enterré pour bénéficier de la lumière du jour. Dessous : un parking véhicules légers et deux sous-sols où sont remisés 184 bus, soit 64 de plus

qu'avant. Le collège voisin s'agrandit sur la parcelle de la RATP qui accueille aussi une crèche (livraisons : fin 2017).

→ Bâtir au-dessus d'une installation classée

« Nous avons eu le droit de construire au-dessus d'une installation classée pour la protection de l'environnement grâce à des mesures compensatoires, a témoigné M. Lamontre. Un plancher coupe-feu quatre heures isole l'activité industrielle des étages, le sprinklage est renforcé et les pompiers sont présents 24h/24. » ■



Le dépôt de bus Lagny-Pyrénées (Paris 20^e), semi-enterré, est éclairé par la lumière du jour.

L'ITA-AITES RÉCOMPENSE OUVRAGES, TECHNIQUES ET PERSONNALITÉS DU MONDE SOUTERRAIN



La technologie EPB minimise les risques des creusements lors de la réalisation du métro de Doha (Qatar).

Dix prix ont été remis par l'Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain (ITA-Aites), au 15^e congrès de l'Aftes, en novembre à Paris (4 000 participants).

Le prix du plus grand projet - plus de 500 millions d'euros - a été accordé au métro de Doha (Qatar, 16,2 milliards d'euros). Sur le tracé, deux tunnels jumeaux à voie unique ont été construits grâce à la technologie EPB qui minimise les risques liés aux tassements en surface, aux écroulements, aux venues d'eau soudaines (roche karstique), à l'excavation sous des structures sensibles ou sous des canaux d'eau de mer artificiels. Des creusements sur la liaison ferrée entre la Chine et Hong Kong ont été rete-

nus par l'ITA-Aites parmi 4 projets entre 50 et 500 millions d'euros. Les travaux, ici en terrain meuble, interviennent sous des zones très habitées, parfois près d'un tunnel d'alimentation en eau ou en dessous d'une ligne de métro.

Des tunnels sur le site de deux centrales norvégiennes ont remporté le prix des moins de 50 millions d'euros. Le chantier s'est déroulé à partir d'un fjord.

→ Contrôle à distance du béton projeté

Le Japon est à l'honneur avec le prix du projet innovant pour la création d'une bifurcation de 20 m de large et 200 m de long, dans une autoroute souterraine sous un quartier résidentiel de Yokohama, ceci grâce à une machine à bouclier

d'élargissement associée à une couverture tubulaire grand diamètre.

Smuti (Royaume-Uni) a reçu un prix de l'innovation pour sa méthode de contrôle de la résistance du béton projeté, en temps réel, à distance.

Un tunnel de 3,8 km dans le Maryland (États-Unis) a été reconnu "initiative développement durable de l'année". Relié aux égouts par des puits de 30 m, il leur sert d'exutoire, empêchant ainsi des débordements dans la rivière Anacostia.

Le prix sécurité revient à un bras robotique qui s'installe dans le corps avant d'un bouclier de tunnelier. Semi-automatique, le Telemach est actionné à partir du poste de commande. Il peut remplacer des molettes usées, les nettoyer, etc.

→ Plan cavernes à Hong Kong

La région administrative spéciale de Hong Kong s'est dotée d'un plan directeur pour ses cavernes en vue de les utiliser pour stocker vivres, données, archives ou y abriter des laboratoires de recherche, des parkings, etc. Ce plan a reçu le prix de conception d'un espace souterrain innovant.

Enfin, deux professionnels norvégiens ont été distingués : Tobias Andersson, jeune ingénieur qui, avec son équipe, a mené à bien un chantier près du cercle arctique, et le Prof. Einar Broc, spécialiste des installations hydroélectriques, pour l'ensemble de sa carrière. ■

PRIX DE L'INGÉNIEURIE À DES PROJETS HORS NORMES

Renzo Piano Building Workshop, maître d'œuvre du nouveau palais de justice de Paris (Paris 17^e), a remporté le grand prix national de l'ingénierie, décerné par Syntec Ingénierie*. Le jury a qualifié le bâtiment de "ville à lui tout seul". Ont été soulignés la façade en verre porteuse de panneaux photovoltaïques, la superposition de 3 blocs sur une hauteur totale de 160 m qui en fait un "bâtiment-tranche" avec joints de dilatation, noyaux plus larges en bas, études de vent poussées et clés de cisaillement pour homogénéiser les déplacements transversaux.

L'opération, conçue en Bim, a aussi remporté l'équerre d'argent du Moniteur.

→ Iter primé

Le prix industrie et conseil en technologies a été attribué à Alain Baudry et son équipe du consortium Engage, assistant à maîtrise d'ouvrage et maître d'œuvre du projet Iter, réacteur expérimental de fusion nucléaire**.

Des prix de l'ingénierie du futur ont été remis à des étudiants (www.avenir-ingenierie.fr).

www.ecologie-solidaire.gouv.fr (19 octobre) ; www.syntec-ingenierie.fr

* Avec les ministères de la Transition écologique, de la Cohésion des territoires, la Direction générale des entreprises et Le Moniteur.

** Cf. Travaux n° 935, septembre 2017, page 6.



Ce bras robot peut remplacer une molette usée sur un bouclier de tunnelier.



Plusieurs innovations sont mises en œuvre sur le palais de justice de Paris, "bâtiment tranche" de 160 m de haut en 3 blocs.

1^{er} TROPHÉE BÉTON PROFESSIONNEL

Une exposition sera consacrée aux 25 réalisations qui ont concouru au 1^{er} trophée béton professionnel*, du 17 octobre au 9 novembre 2018 à la Maison de l'architecture en Île-de-France (Paris 10^e). Parmi elles, 10 ont obtenu un trophée.

Signalons le Centre international d'art pariétal Lascaux-Montignac ouvert fin 2016, par le département de la Dordogne. Semi-enterré et recouvert d'une toiture végétale, il se fond dans le paysage. Il est tout en béton y compris la grotte, en béton projeté sur ossature métallique puis sculpté pour imiter la roche (architectes :

Snohetta avec Duncan Lewis Scape, co-conception, et SRA architectes, co-réalisation).

→ **Porte-à-faux courbe de 56 m de portée**

Signalons aussi le parking silo de la Villeneuve à Grenoble (Grudzinski et Poisay architectes, 2015) et le Mémorial international Notre-Dame-de-Lorette à Ablain-Saint-Nazaire (Pas-de-Calais) en béton fibré haute performance avec un porte-à-faux courbe de 56 m de portée (Hauts-de-France, Philippe Prost AAPP, 2014).

www.maisonarchitecture-idf.org.

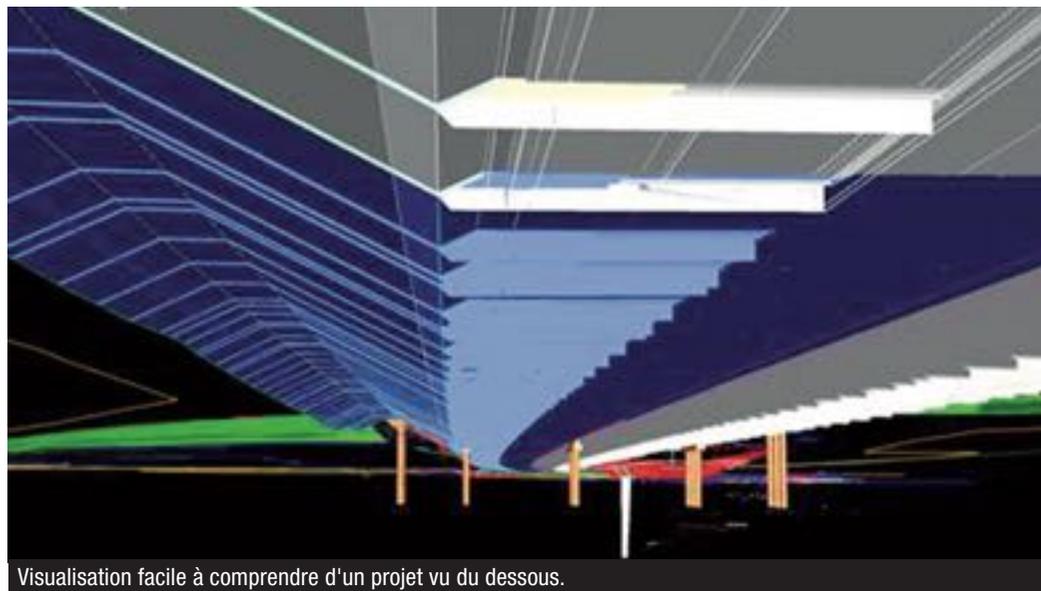
* Organisé par Betocib et Cimbéton.



© BICEGLY, GRAZIA PHOTOGRAPHERS

Le Centre international d'art pariétal Lascaux-Montignac, semi-enterré, en béton.

AVANCER DANS LE BIM EN LE PRATIQUANT



Visualisation facile à comprendre d'un projet vu du dessous.

© EGIS VILLES ET TRANSPORTS

Le Bim progresse par l'expérience. « Depuis 2012, nous partageons plus d'informations, les outils numériques se sont améliorés, » constate Charles-Édouard Tolmer, chargé du Bim à Egis International⁽¹⁾. Toutefois, la conversion des données entre logiciels prend encore beaucoup de temps et d'énergie. « Les IFC - structuration des données pour être interopérables - manquent en infrastructures plus que dans le bâtiment, » observe Michel Aroichane, responsable Bim à la Société du Grand Paris.

La France n'a pas rendu obligatoire le Bim en marché public (directive européenne 2014/24). Cependant, un "engagement volontaire pour la généralisation de la construction en 2022" a été signé à Bâtimat 2017 entre le ministre de la cohésion des territoires et le secteur de la construction.

« Les entreprises doivent s'y mettre à cause de la concurrence internationale de pays où le Bim est plus naturel (Grande-Bretagne, etc.), » estime Louis

Demilecamps, président du projet Minnd (Bim en infrastructures). Le projet coopère avec le monde des systèmes d'informations géographiques (SIG) tant la convergence avec le Bim ressort.

Les petits projets, complexes, bénéficient du Bim. « Les équipes ont été motivées en interne, a constaté Denis Le Roux, de Setec ALS, Bim manager sur le réaménagement de l'échangeur A36/RN1019 à Sevenans (Territoire de Belfort, APRR). La maquette numérique figurait dans le dossier de consultation des entreprises. Elles ont mieux compris le chantier, ont pu vérifier leurs métrés et ajuster leurs prix. »

→ **Pas trop de détails dans les synthèses**

Le Bim stimule la communication entre co-acteurs. « Nous avons bien discuté avec le client, a indiqué Yingying Duret, ingénieur conception infrastructures d'Egis villes et transports, à propos de l'élargissement d'une route⁽²⁾. Le Bim a été construit dès le départ sur les usages qui en seraient faits. Nous nous sommes

interrogés sur le niveau de détails à fournir. Il faut les informations nécessaires et conformes à telle étape de l'étude, pas plus. » Tout ne doit pas figurer dans la maquette de synthèse.

Le Bim traite les problèmes plus tôt. « La maîtrise d'œuvre a plus de travail au départ mais cela lui sert par la suite, note Denis Le Roux. Le Bim réduit les bêtises. » « Nous avons détecté 300 clashes au début, entre 10 et 30 étaient restés au stade de la maquette finale, » a relaté Julien Benoit, de Legendre Construction (2^e ligne du métro de Rennes). « Nous avons détecté un conflit entre une caténaire et un escalier, a témoigné Hicham Benchemled, de SNCF Réseau, à propos de la modernisation de la gare de Lisieux (Calvados). Nous avons aussi simulé la visibilité de la signalisation pour les conducteurs de train, ce qui a raccourci leurs délais d'approbation. »

→ **Filterer les informations**

Le Bim ne se termine pas au dossier des ouvrages exécutés. « Il faut garder la traçabilité des processus de décision sur le long terme pour savoir pourquoi on a fait ça à l'époque, » recommande Louis Demilecamps. Les informations dans un DCE ou mises à disposition des usagers doivent être filtrées, conseille Michel Aroichane. La normalisation des méthodes et des échanges contribue à la confiance, rappelle Pascal Lemoine, directeur technique et de la recherche de la FNTP. ■

À LIRE ET À RELIRE

- **Travaux : Spécial Bim, n°917 septembre 2015 ; Spécial Bim 2, n°934, juillet-août 2017.**
- **Guide d'application Bim Luxembourg (2017, www.digitalbuilding.lu).**
- **Le Bim éclairé par la recherche (2017, Eyrolles).**
- **Bim et maquette numérique, guide de recommandations à la maîtrise d'ouvrage (2016, www.batiment-numerique.fr).**
- **Réussir le Bim pour l'exploitation (2016, www.hexabim.com).**

⁽¹⁾ Les personnes citées sont intervenues à la journée Bim et infrastructures de Ponts Formation Conseil le 30 novembre à Paris.

⁽²⁾ Lieu et maître d'ouvrage confidentiels, projet en cours.

RÉNOVATION DU BARRAGE DE BIMONT

Le barrage de Bimont, situé à l'est d'Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône) à Saint-Marc-Jaumegarde, est entré en phase de rénovation après un an et demi de préparation. L'ouvrage, au pied de la montagne Sainte-Victoire (1 000 m), est une réserve d'eau de 14 millions de mètres cubes. Il a été vidé de mai à octobre 2017. Une dérivation a pris le relais pour acheminer les eaux en provenance du Verdon vers Marseille, Aix-en-Provence, la zone industrielle de la Vallée de l'Arc et d'autres communes. Des fissures étaient apparues en surface du barrage en voûte dès 1960, quelques années après sa mise en service (1952). Plusieurs noyaux des consoles avaient été réalisés avec un ciment trop chaud. L'eau a engendré une réaction sulfatique

interne, d'où des gonflements qui ont cisailé le béton à leur périphérie.

→ Fissures profondes à combler

« Pour localiser les fissures profondes, nous avons d'abord rapproché les photos du phasage du chantier d'origine avec l'emplacement des désordres, explique Catherine Casteigts, conductrice de la rénovation à la Société du canal de Provence (SCP), gestionnaire du barrage. Puis nous avons affiné l'analyse en modélisant les gonflements, par des calculs et des forages de reconnaissance. Seule la rive droite est affectée par ce phénomène. » Les désordres se sont stabilisés. La SCP profite de la rénovation pour relever la cote d'exploitation d'une dizaine de mètres, niveau d'avant 1983, ce qui augmente le volume d'eau

stocké de 14 millions de mètres cubes à 25.

Dimensions du barrage : 87 m de haut, 180 m de ligne de crête ; épaisseur en pied 17 m, en tête, 4 m.

Les travaux ont lieu à partir du parement aval, sur des échafaudages. Les forages par lesquels un coulis sera injecté autour de clous dans les fissures ont commencé fin 2017. L'injection et le comblement des joints ouverts se terminent à l'été 2018.

Les autres améliorations comprennent l'ajout d'un voile de drainage en fondation, l'insertion de tirants actifs dans la culée rive droite et la pose d'une membrane d'étanchéité rive droite mais sur la face amont.

→ Suivi à distance du comportement de l'ouvrage

Ces travaux, de septembre 2017 à avril 2019, sont confiés à Demathieu et Bard. La remise en eau aura lieu de mai à décembre 2019 avec un télé suivi du comportement de l'ouvrage, grâce à des capteurs en surface, sous le barrage, sur les joints entre consoles et à cinq pendules dont un dans chaque culée.

La réhabilitation du barrage - 6 millions d'euros HT - fait partie d'une opération de 20 millions incluant la dérivation, la reprise du barrage Zola (maçonnerie) en aval et celle de la vidange du siphon de l'Arc.

www.bimontfaitpeauneuve.fr ;
www.canal-de-provence.fr ■

MONNOYEUR INVESTIT DANS LE BIM

Monnoyeur a repris Vianova Systems Benelux, spécialiste des solutions CAO et Bim pour le génie civil et la construction, revendeur Autodesk et Trimble.

Le groupe entend ainsi renforcer son offre de solutions intégrées, matériels et logiciels. Il distribue notamment les équipements Caterpillar à travers ses filiales Bergerat Monnoyeur.

VINCI EN AUSTRALIE ET AU CANADA

Vinci Construction a racheté Seymour Whyte, entreprise australienne spécialisée en génie civil, terrassement, voiries et réseaux divers.

Par ailleurs, Spiecapag Canada, filiale du groupe Vinci, va réaliser avec Macro Enterprise en joint-venture, un tronçon de 85 km, en diamètre 915 mm, de l'oléoduc qui vient doubler l'existant entre l'Alberta et la Colombie Britannique (Vancouver). Le chantier, attribué par Trans Mountain Pipeline, se termine en novembre 2019.

LEICA GEOSYSTEMS AVEC SCANLASER

Leica Geosystems (mesures en travaux publics) a fusionné avec Scanlaser. La nouvelle entité propose ainsi des solutions allant du guidage d'engins de terrassement aux outils 3D comme le relevé "tel que construit" utilisé en Bim.

ATTRIBUTION À SACLAY

La maîtrise d'œuvre urbaine, architecturale, paysagère et environnementale du secteur Saint-Quentin Est à Guyancourt* (Yvelines) de l'opération Paris-Saclay a été attribuée à l'équipe réunissant l'atelier Marniquet-Auboin, D'ici là, Transitec, Filigrane, Safège et Urban Eco Scop.

* Cf. Travaux n°929, décembre 2016, page 8.

SOCIÉTÉ DU CANAL DE PROVENCE, SPÉCIALISÉE EN AMÉNAGEMENT HYDRAULIQUE

La Société du canal de Provence (SCP), gestionnaire du barrage de Bimont pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, a été créée en 1957. Les ouvrages du canal de Provence, infrastructure réservée à l'alimentation en eau, sont transférés de l'État à la Région depuis 2008.

La SCP est détenue à 82 % par les collectivités : Région, Marseille, départements du Var, des Bouches-du-Rhône, du Vaucluse, des Alpes-de-Haute-Provence et des Hautes-Alpes.

La SCP, agréée pour la maîtrise d'œuvre et l'auscultation des digues et barrages par l'État, exerce son savoir-faire en aménagement hydraulique dans 40 pays.

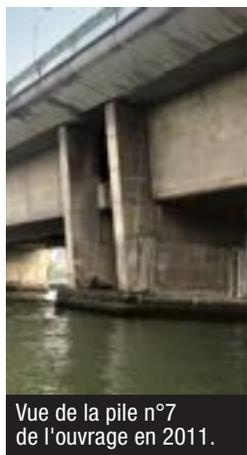


Pose des échafaudages à l'automne 2017 en rive droite du barrage voûte à double courbure du Bimont, au pied de la montagne Sainte-Victoire (Bouches-du-Rhône).

RÉHABILITATION DU PONT HOUPHOUËT-BOIGNY

Eiffage Génie Civil et Spie Fondations ont remporté le marché de la réhabilitation du pont Félix-Houphouët-Boigny à Abidjan (Côte-d'Ivoire). Construit entre 1954 et 1957, c'est un pont rail-route de 25 m de large sur 376 m de long. Il comprend huit travées double caisson de 47 m en béton précontraint posé sur des pieux inclinés. Il s'agit en trente mois, jusqu'au printemps 2020, de restaurer l'ouvrage et d'ajouter des fondations dont des pieux descendant à 70 m.

Les 52,5 millions d'euros du chantier sont financés par l'Agence française de développement.



Vue de la pile n°7 de l'ouvrage en 2011.

CENTRE D'ESSAIS VOITURE CONNEXÉE À LA ROUTE

Le Centre d'essais pour véhicules autonomes (Ceva) sera opérationnel dans la seconde moitié de 2018. Issu d'un partenariat entre Colas Île-de-France et l'Utac Ceram, il s'installe sur le centre d'essais automobiles de Linas-Montlhéry (Essonne). Y seront développés et testés des systèmes d'intelligence embarquée en liaison avec des infrastructures routières. Ceva reçoit une aide du programme d'investissements d'avenir.

LES GESTES D'OR DISTINGUENT CEUX QUI RESTAURENT LE PATRIMOINE



Pont en béton coulé de Louis et Joseph Vicat dans le Jardin des plantes de Grenoble (Isère) après restauration.

Le 1^{er} pont en béton coulé signé Louis et Joseph Vicat a été restauré. La conservation-restauration de l'ouvrage situé dans le Jardin des plantes de Grenoble (Isère) a remporté un geste d'argent, catégorie métier, du concours de l'association du Geste d'or qui récompense des acteurs de la valorisation du patrimoine bâti⁽¹⁾. Plus de quarante prix ont été remis au Salon international du patrimoine culturel (2-5 novembre, Paris), chaque catégorie et niveau pouvant être attribué à plusieurs opérations/acteurs. Le pont en béton coulé date de 1855. Sa remise en état distingue Les ateliers du paysage et la ville de Grenoble.

L'entreprise Vicat a été associée à travers son ciment naturel (Prompt).

Le groupe Vicat a aussi reçu un geste d'or "grand prix entreprise" lors de la reproduction à l'identique de la mandorle (haut-relief) de Saint-Irénée de Lyon (Rhône) par Marc Colson, artisan d'art fontainier rocailleux, avec le même ciment.

Dans la même catégorie, un 2^e geste d'or a été remis à Girard, filiale de Vinci Construction France, pour son activité en restauration du patrimoine et de monuments historiques.

D'autres filiales ont été distinguées. Dumez Île-de-France a remporté deux

gestes d'argent, un "grand prix amont" pour une opération rue Marengo, à Paris, et un "grand prix métiers" pour un immeuble rue d'Amsterdam, à Paris également.

→ Protection des intervenants à la Samaritaine

GTM Bâtiment obtient un geste d'argent "prix Bachelard des quatre éléments" pour la résidence Lorraine (Paris 19^e). Enfin, Petit s'est vu attribuer le seul geste d'or "grand prix santé" pour la gestion de la sécurité et de la santé de ses collaborateurs sur le chantier de la Samaritaine (Paris).

→ Prix maître d'ouvrage et maître d'œuvre

Parmi les autres primés, citons la Bibliothèque nationale Richelieu, en restauration jusqu'en 2019⁽²⁾, qui reçoit un geste d'or "grand prix architecture, urbanisme et société".

Le château de Chambord (Loir-et-Cher) obtient le geste d'or "grand prix architecture, paysage et patrimoine". Le seul grand prix maître d'ouvrage revient à la Régie immobilière de la ville de Paris, et le seul grand prix maître d'œuvre, à Jardin patrimoine. ■

⁽¹⁾ L'Association du geste d'or récompense maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises, métiers du chantier et chantiers, gestionnaires et autres acteurs du patrimoine bâti. www.legestedor.com.

⁽²⁾ Cf. Travaux n°911, décembre 2014, page 24 et n°904, mars 2014, page 8.

LA SEINE-SAINT-DENIS RETIENT LES EAUX DE PLUIE

Les eaux de pluie provoqueront moins de débordements à Livry-Gargan (Seine-Saint-Denis) en 2018. Un collecteur de 2000 mm de diamètre intérieur (2400, extérieur) les acheminera jusqu'au bassin de rétention du Rouailler de 26000 m³ déjà construit. Il vient assister le collecteur existant de 1200 mm.

Ces travaux s'inscrivent dans le programme du département de Seine-Saint-Denis pour lutter contre les inondations et protéger les rivières de rejets pollués. Le collecteur de 620 m au total comprend une courbe de 100 m avec un rayon de 110 m, ceci pour passer sous

une voie de chemin de fer. Le creusement par microtunnelier, commencé en novembre 2016, s'est terminé en octobre dernier. Des tubes plus courts ont été employés pour cette partie : 1,50 m au lieu de 3 m, assemblés par des joints hydrauliques. La tête du microtunnelier était articulée. Les trois puits construits à cette occasion serviront d'ouvrages de visite.

→ AMO en Bim

La Sade (mandataire) et Bessac sont chargés de ce lot du chantier. Le Bim est utilisé par la Sade en assistance à la maîtrise d'œuvre (direction de l'eau et de l'assainissement du département). ■



Le collecteur comprend 100 m en courbe sous une voie ferrée.

CONTRIBUTIONS DU CEREMA À L'INNOVATION



© CEREMA

Le Cerema suit pendant cinq à dix ans le comportement du passage à faune bois-béton.

Le Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) participe à l'étude d'un prototype de pont en bois lamellé collé surmonté d'une dalle en béton, construit sur la RN 19 à Bouhans-lès-Lure (Haute-Saône). Dédié au passage de la faune, il est suivi depuis le printemps 2017 et pour cinq-dix ans.

Le projet implique aussi l'Ifsttar et l'École nationale supérieure des technologies et industries du bois d'Épinal.

La construction a été confiée à Eiffage et Arbonis.

L'instrumentation (sondes et capteurs sur les poutres en bois) a été posée par l'université d'Égypton (Corrèze).

La Direction régionale de l'environnement et de l'aménagement Bourgogne/Franche-Comté en est maître d'ouvrage et la direction interdépartementale des

routes Est (Dir Est), maître d'œuvre. L'objectif des partenaires est d'aboutir à un modèle standard, fabriqué avec les bois disponibles sur place, réalisable par les entreprises locales, et abordable pour les collectivités.

→ Deux guides à paraître

Les données recueillies compléteront des travaux antérieurs (Nice, Chambéry) et alimenteront deux guides pratiques sur cette famille d'ouvrages.

Parmi les autres contributions que le Cerema a mis en avant à la semaine de l'innovation publique (20-26 novembre), citons sa participation au projet européen Seramco⁽¹⁾ avec 17 partenaires sur les matières premières secondaires pour les produits préfabriqués en béton, lancé en juin 2017.

→ Ausculter la chaussée à 100 km/h

Le Centre a aussi développé un véhicule

qui ausculte une chaussée à 100 km/h, de jour comme de nuit. L'Aigle 3D modélise la surface.

Avec la Dir Massif central, il a élaboré une cartographie de la sensibilité acoustique du réseau routier. Predir visualise la sensibilité au bruit des tronçons de route afin de savoir où « les techniques d'enduits bruyantes peuvent être déployées sans risque et là où elles sont à proscrire. »

Avec l'Institut national de recherche agronomique, le Cerema a conçu un logiciel qui automatise la collecte et le croisement d'informations foncières. Les données proviennent de bases existantes ou sont entrées dans Urbansimul par l'utilisateur. ■

⁽¹⁾ Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products.

CENTRALE ÉLECTRIQUE DE LA MEIJE

La centrale hydro électrique de la Meije (Hautes-Alpes) sera mise en service en 2019 et exploitée par Unite Hydrowatt. Implantée sur la Romanche, elle aura une puissance de 3,6 MW et fournira 13 580 MWh par an (5 000 foyers).

Une conduite forcée de 4,2 km relie la prise d'eau à 1 431 m d'altitude à la centrale située à 1 318 m (hauteur de chute 113 m, débit maximum 4 m³/heure). Le chantier, débuté en avril 2017, se termine fin 2018.

→ Sacs de calage

Cette conduite est constituée de tuyaux en fonte ductile (Saint-Gobain PAM). Le fournisseur a emboîté les petits diamètres dans les plus grands pour le transport afin de réduire le nombre de camions de moitié, à 256 véhicules, la centrale se trouvant dans le Parc des Écrins. Les tuyaux sont recouverts d'un film de protection et séparés par des sacs de calage, là où étaient utilisés des cales en bois par le passé.

FRICHE CONVERTIE EN LABORATOIRE

La reconversion du nord-est du camp militaire des Fromentaux à Leyment (Ain) a commencé en septembre et

devrait se terminer en 2020. L'opération est un chantier laboratoire de démolition mené par IDfriches, la Communauté de

communes de la plaine de l'Ain et le groupe Brunet. Elle bénéficie du fonds européen Feder et débouchera sur un technopôle de l'innovation dans l'espace public, Acmutep.

Le site, fermé en 2004, couvre 37 hectares et comporte 200 bâtiments militaires.

→ Désamiantage par un robot

Un robot de désamiantage, conçu par SFTP avec Akéo+, va être finalisé grâce à ce chantier. Un drone enregistre les travaux et suit la croissance de la végétation. Il est couplé à un scanner 3D et à une modélisation numérique.

Enfin, la base de vie pour une quarantaine de personnes est autonome en énergie grâce à 32 panneaux photovoltaïques. Son autonomie en eau était aussi un des objectifs. ■



© IDFRICHES AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

L'ex-base militaire des Fromentaux à Leyment (Ain).



© SAINT-GOBAIN PAM

Les tuyaux de la conduite forcée sont emboîtés les uns dans les autres pendant le transport.

PRODUITS SUR MESURE EN BÉTON POUR TUNNELS

Stradal a fourni une chambre de raccordement de lignes de télécommunications en béton pour le tunnel de Propriano (Corse), sur la déviation de la ville dont les travaux arrivent à leur fin.

Le fournisseur d'ouvrages spéciaux en béton sur mesure était présent au congrès de l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain (novembre, Paris).



Chambre de télécommunications (1^{er} plan) au tunnel de Propriano (Corse, juin 2017).

LIGNE ENTERRÉE DANS LAUSANNE

Afin de diminuer le nombre d'accidents sur l'avenue d'Echallens à Lausanne (Suisse), l'Office fédéral des transports a décidé de remplacer la voie ferrée aérienne par un tunnel et a confié l'opération à Infra Tunnel (2017-2020).

Cette ligne urbaine est de plus en plus fréquentée (+150% en quinze ans).

Les travaux ont lieu à partir d'un puits de 40 m au droit du Parc de la Brouette, qui servira à la ventilation ensuite. Le tunnel de 1,5 km est excavé en deux parties : une demi-section supérieure puis une demi-section inférieure. Le soutènement est constitué de béton projeté fibré et de cintres lourds mis en œuvre à chaque phase de creusement de 1 m.

La contre-voûte reçoit un radier en béton armé. Cette méthode vise à diminuer la transmission des vibrations aux bâtiments au-dessus.

BRUIT FERROVIAIRE : L'INTÉGRER DANS LE PAYSAGE URBAIN



Des passages à niveau en ville - ici à Montbrun-Bayonne (Pyrénées-Atlantiques) - sont insonorisés par des dalles en caoutchouc recyclé.

« Le bruit est le plus fort impact sur l'environnement dénoncé par les riverains d'un projet de ligne de train, a informé Anne Guerrero, directrice adjointe à l'environnement et au développement durable de SNCF Réseau⁽¹⁾. En même temps, c'est le moins ressenti par la population de tous les moyens de transport. » Les émissions sonores des trains ont été réduites de 10 à 15 DB(A) en vingt ans. Un tiers des 30 000 km de voies ferrées sont encore bruyantes. Les solutions techniques ne manquent pas comme l'insonorisation des passages à niveau en ville. La SNCF introduit des objectifs acoustiques lors d'opérations de maintenance comme le meulage du rail et le reprofilage des roues.

« Le fret peut encore être modernisé, notamment en optant pour des semelles de frein en composite au lieu de la fonte, estime M^{me} Guerrero. Il faut aussi considérer l'insertion des infrastructures dans le paysage urbain, tenir compte davantage du ressenti humain et moins se focaliser sur la source du bruit. »

→ Penser au son

« Dans notre démarche de conception innovante, nous réunissons d'autres compétences que celles d'acousticiens, explique Françoise Dubois, chef de projet confort des voyageurs à la SNCF. Au moment de la définition de l'architecture du projet, on parlera du son, différent du bruit qui, lui-même, peut être un indicateur du bon fonctionnement du train. »

Travailler sur les ambiances sonores est une des spécialités d'Acirene : « Grâce à des enregistrements sonores, nous essayons de comprendre comment le bruit du train s'intègre dans l'environnement, » développe Cécile Regnault, architecte au bureau d'études. Un nouveau quartier en périphérie de Montpellier (Hérault) allait être traversé par une voie de train régional à fort trafic. Il a été doté d'une gare. Le train est alors perçu comme une alternative positive à la voiture et donc, son bruit, mieux admis. Systra a conçu un outil web qui fait entendre le bruit prévisible d'une infrastructure, selon différentes solutions. Cela parle plus au public qu'une carte de l'intensité sonore.

→ Des relations qui apaisent l'atmosphère

« Pour calmer l'environnement sonore autrement que par des moyens techniques longs à rendre effectifs, il faut considérer le territoire traversé par une ligne, conseille Dominique Bidou, président du Centre d'information sur le bruit. La SNCF doit entretenir des relations en permanence avec les autres acteurs et pas seulement au moment d'un projet. Nous travaillons avec l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie sur l'intégration du bruit dans les Plans climat air énergie territorial. » ■

MIEUX CONNAÎTRE LES VIBRATIONS

Les vibrations ressenties par exemple, au passage d'un métro souterrain, ne sont pas réglementées. Elles sont toutefois traitées par les normes de la série 14837.

Leur perception est tactile et auditive. Elles se transmettent dans le sol à la structure d'un bâtiment et génèrent du bruit solidien.

La norme Iso 14837-32 aide à caractériser les sols traversés par une vibration à partir de la propagation en surface d'un son.

Les projets européens Rivas et Cargovibes s'intéressent aux vibrations des trains de fret.

Le Cerema travaille sur les vibrations d'un chantier qui peuvent causer des dommages aux constructions environnantes et aux équipements. Le Cinov Groupement de l'ingénierie acoustique (Giac) anime un groupe de travail vibrations.

⁽¹⁾ Aux 8^e assises de l'environnement sonore, 27-29 novembre, Paris, Centre d'information sur le bruit. Atelier : Le bruit ferroviaire, un enjeu de report modal ?.

AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 13 MARS

La précontrainte de demain

Lieu : Paris

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

• 15 MARS

Infrastructures routières : fonctions et apports des géosynthétiques

Lieu : Ifsttar (Marne-la-Vallée)

www.cfg.asso.fr

• 14 AU 16 MARS

Symposium international sur la sécurité des tunnels

Lieu : Borås (Suède)

<http://istss.se>

• 26 AU 28 MARS

Congrès mondial Préservation du patrimoine routier

Lieu : Nice

www.orquasi.fr

• 27 AU 30 MARS

Global Industrie

Lieu : Paris-Nord Villepinte

www.tolexpo.com

• 29 AU 31 MARS

Tunirock, conférence internationale de mécanique des roches

Lieu : Hammamet (Tunisie)

www.atmr.tn

• 4 ET 5 AVRIL

Hvolution (hydrogène énergie)

Lieu : Parc floral Vincennes

(Val-de-Marne)

www.hvolution-event.com

• 16 AU 19 AVRIL

Transport Research Arena

Lieu : Vienne (Autriche)

www.traconference.eu

• 21 AU 26 AVRIL

Congrès tunnels ITA-AITES

Lieu : Dubaï (Émirats Arabes Unis)

www.wtc2018.ae

• 23 AU 28 AVRIL

Intermat et World of Concrete Europe

Lieu : Paris (Villepinte)

www.intermatconstruction.com

• 25 AU 27 AVRIL

L'ingénierie des pays émergents

Lieu : Kuala Lumpur (Malaisie)

www.iabse.org

• 22 AU 26 MAI

Eurock, géomécanique et géodynamique des roches

Lieu : Saint-Petersbourg (Russie)

<http://eurock2018.com/en>

• 12 AU 14 JUIN

Sécurité incendie et ventilation dans les tunnels

Lieu : Graz (Autriche)

<http://ivt.tugraz.at>

• 13 AU 15 JUIN

Congrès suisse des tunnels

Lieu : Lucerne (Suisse)

www.swisstunnel.ch/fr/

• 24 AU 27 JUIN

Conférence sur les tunnels en Amérique du nord

Lieu : Washington (États-Unis)

www.natconference.com

• 25 AU 29 JUIN

Dynamique des roches et applications

Lieu : Trondheim (Norvège)

<http://www.rocdyn.org>

FORMATIONS

• 5 MARS

Engager une démarche d'isolation acoustique

Lieu : Paris

<http://evenements.infopro-digital.com>

• 6 MARS

Fondamentaux du Bim

Lieu : Bordeaux

<http://evenements.infopro-digital.com>

• 7 AU 9 MARS

Fondamentaux techniques des systèmes ferrés guidés urbains

Lieu : Paris

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

• 13 MARS

Maîtriser le risque amiante en phase de repérage

Lieu : Lyon

<http://evenements.infopro-digital.com>

• 19 ET 20 MARS

Bureau d'études techniques : déployer le Bim en interne

Lieu : Paris

<http://evenements.infopro-digital.com>

• 20 MARS

Le Bim au service des infrastructures des collectivités

Lieu : Lyon

<http://evenements.infopro-digital.com>

• 26 ET 27 MARS

Les outils du Bim

Lieu : Paris

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

• 26 ET 27 MARS

Offres de mobilité en milieu rural et périurbain

Lieu : Paris

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

• 26 ET 27 MARS

Stratégies et projets urbains autour des gares

Lieu : Paris

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

• 27 ET 28 MARS

Procédures et études pour la conduite des projets d'infrastructures de transport

Lieu : Île-de-France

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

• 28 AU 30 MARS

Fondamentaux du management d'équipes dans le BTP

Lieu : Paris

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

• 4 AU 6 AVRIL

Reconnaissance des sols : essais in situ et prélèvements

Lieu : Paris

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

• 11 AU 13 AVRIL

Lean management appliqué aux chantiers

Lieu : Paris

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

NOMINATIONS

ANRU :

Olivier Klein préside l'Agence nationale pour la rénovation urbaine à la suite de François Pupponi.

APPRENTISSAGE :

Sylvie Brunet préside la concertation sur l'apprentissage en tant que présidente de la section travail et emploi du Conseil économique, social et environnemental.

BOUYGUES :

Christophe Liénard a été nommé directeur de l'innovation du groupe. Il remplace Étienne Gaudin, chargé de la route solaire.

CEREMA :

Patricia Blanc a été élue présidente du conseil d'administration du Centre d'expertise pour les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, suite à la démission de Gaël Perdriau en octobre dernier.

EIFPAGE CONSTRUCTION :

Franck Gauthier est le nouveau directeur des ressources humaines suite au départ de Claudine Font, devenue directrice du développement social et humain du groupe Eiffage.

EPFA GUYANE :

Denis Girou prend la direction de l'Établissement public foncier et d'aménagement de la Guyane relevant de l'État, après Patrice Pierre.

FIDIC :

Alain Bentéjac a été élu président de l'International Federation of Consulting Engineers (Fidic). Il succède à Jae-Wan Lee (République de Corée).

ITER :

M. Arunkumar Srivastava (Inde) préside depuis le 1^{er} janvier le Conseil d'Iter, installation expérimentale de fusion d'atomes de Saint-Paul-lez-Durance (Bouches-du-Rhône). Il remplace le Pr Won Namkung (Corée).

MINÉRAUX INDUSTRIELS :

Frédéric Coueriot préside désormais l'association Minéraux industriels France (MI-F), syndicat professionnel adhérent de l'Unicem. Il prend la suite de Corinne Cuisinier.

SNBPE :

Jean-Marc Golberg devient président du Syndicat national du béton prêt à l'emploi, en remplacement d'Alain Plantier.

UNPG :

Alain Plantier a été élu président de l'Union nationale des producteurs de granulats. Il succède à Arnaud Colson.

DES MÉTIERS MULTIPLES SOUS UNE SEULE MARQUE

AU SEIN DU GROUPE BOUYGUES CONSTRUCTION, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS EST LA FILIALE SPÉCIALISÉE DANS LE GÉNIE CIVIL ET LES OUVRAGES D'ART. **ENTRETIEN AVEC BERTRAND BURTSCHELL, DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT DE BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



BIEN QUE L'ESSENTIEL DE CE NUMÉRO DE TRAVAUX SOIT CONSACRÉ AU « SOUTERRAIN », IL ÉTAIT DIFFICILE DE NE PAS ÉVOQUER, NE SERAIT-CE QUE BRIÈVEMENT, QUELQUES-UNS DES CHANTIERS « DE SURFACE » QUE RÉALISE ÉGALEMENT BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS EN FRANCE ET À L'INTERNATIONAL, D'AUTANT QU'ILS TÉMOIGNENT, CHACUN DANS LEUR DOMAINE, DE LA DIVERSITÉ DES « MÉTIERS » QU'ELLE SAIT DÉPLOYER. CE QUE NOUS MET EN LUMIÈRE CET ENTRETIEN AVEC BERTRAND BURTSCHELL, DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT RÉGION PARISIENNE ET GRANDS TRAVAUX FRANCE DE BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS.

Comment Bouygues Travaux Publics s'insère-t-elle dans l'organisation générale de Bouygues Construction ?

Bouygues Travaux Publics est une filiale de Bouygues Construction. Experte des projets complexes à forte valeur ajoutée, la société est l'un des leaders mondiaux dans les domaines de l'aménagement des territoires et de la construction d'infrastructures durables. Bouygues Travaux Publics dispose

de compétences et d'un savoir-faire reconnu dans la réalisation de travaux souterrains, de travaux fluviaux et maritimes, de projets linéaires, de génie civil industriel, d'activités de terrassement et de mines à ciel ouvert. De Hong Kong à Miami, Bouygues Travaux Publics a réalisé de nombreux projets emblématiques : le tunnel sous la Manche, le front de mer de Beyrouth, les autoroutes A28 et A41, les ponts de l'île de Ré et de Normandie, le sar-



FIGURE 1 © MARC MONTAGNON - FIGURE 2 © CÉLINE CLANET - FIGURE 3 © B'N'T COMMUNICATION

cophage de Tchernobyl, les métros du Caire et de Sydney, plus de 10 tunnels à Hong Kong. Elle emploie 5 000 collaborateurs, en France et à l'international. Bouygues Travaux Publics a une présence pérenne en Angleterre, en Suisse (PraderLosinger), en Australie (Bouygues Construction Australia) et à Hong Kong (Dragages Hong Kong). Notre société a également deux filiales spécialisées, l'une dans la réalisation de grands équipements énergétiques et industriels, Bouygues Construction Services Nucléaires, et une autre dans l'exploitation des mines à ciel ouvert aux exigences hautement spécifiques, DTP Mining.

Quelle particularité Bouygues Travaux Publics présente-t-elle dans la profession au niveau de l'organisation ?

En France, nous présentons la caractéristique d'avoir une organisation très intégrée, avec une seule marque, toutes spécialités confondues : la porte d'entrée est unique quel que soit le secteur concerné, qu'il s'agisse de tunnels, d'ouvrages d'art ou d'infrastructures routières et ferroviaires.

Ceci nous permet d'établir avec nos clients des relations très personnalisées car ils trouvent en face d'eux des interlocuteurs qui sont toujours les mêmes d'un projet à un autre, par rapport à une organisation par métier ou par zone géographique.

Nous avons par ailleurs la capacité de répondre de manière appropriée à tous types de montage contractuel, du contrat de construction classique à celui de *design and build*, du contrat de PPP à celui de concessionnaire. À ceci s'ajoute un savoir-faire reconnu en ingénierie financière et juridique. De la conception d'un projet jusqu'à

BOUYGUES CONSTRUCTION SERVICES NUCLÉAIRES

Créée en 2009, Bouygues Construction Services Nucléaires est née de la fusion des activités nucléaires de Bouygues Travaux Publics AD et de Quille nucléaire. Cette entité juridique de 300 collaborateurs a 6 métiers spécifiques : le génie civil nucléaire, le démantèlement, la maintenance, la gestion des déchets, la robotique et la conception de machines spéciales et la ventilation avec Novi.

DTP MINING

Implantée en Afrique depuis plus de 15 ans, DTP Mining accompagne ses clients sur l'ensemble de la chaîne de valeur de leurs projets miniers : ingénierie, forage-minage, chargement-transport, maintenance, construction d'infrastructure minière, réseau de transport d'énergie.

PRADERLOSINGER

Issue de la fusion entre Prader Zürich et Losinger Sion (toutes deux créées en 1925). PraderLosinger a été rachetée par Bouygues Travaux Publics en 1991. Avec 200 collaborateurs et un fort ancrage local, PraderLosinger est avant tout la référence des travaux souterrains en Suisse.

1- Bertrand Burtschell, directeur général adjoint de Bouygues Travaux Publics.

2- Tunnel routier sous-marin de Tuen Mun Chek Lap Kok à Hong Kong.

3- Vue d'ensemble du projet d'extension du port de Calais.

4- L'extension en mer de Monaco, conçue par Valode & Pistre.

5- La rocade « L2 » de Marseille.

son exploitation et sa maintenance, Bouygues Travaux Publics intervient sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la construction.

Quelle est votre stratégie, en France comme à l'international, dans le choix des projets auxquels vous répondez ?

Notre stratégie est de développer une activité récurrente dans nos pays pérennes tout en restant à l'affût des grands projets complexes.

Ceci nous a permis de construire une solide réputation d'excellence technique. Grâce à nos innovations et à la créativité de nos équipes, nous gardons une longueur d'avance sur nos concurrents. C'est le cas, par exemple, à Hong Kong, où, chacun le sait, notre ancrage est ancien. Hong Kong a généré, en 2016, 40% de l'activité de Bouygues Travaux Publics au travers de

quatre chantiers assez exceptionnels : trois tunnels, dont l'un de 2 x 5,5 km avec une section creusée à plus de 50 m de profondeur en hyperbarie, et le pont de 9,4 km reliant Hong Kong, Zhuhai et Macao.

Au terme de deux années 2016 et 2017 particulièrement riches en événements en France et à l'international, quels sont les projets à retenir et les tendances de fond à surveiller ?

En France, la prise de commandes est soutenue, notamment grâce aux signatures de l'extension en mer de Monaco ou du port de Calais 2015. Les perspectives sont également encourageantes du côté du Grand Paris Express puisque nous participons déjà à trois chantiers.

La signature de l'EPR d'Hinkley Point C au Royaume-Uni confortera, quant à elle, dans les années qui viennent, une activité plus soutenue en Europe. C'est d'autant plus vrai que la France est, elle aussi, dans une dynamique positive. Après les livraisons programmées de la Rcade L2 à Marseille et du contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier, les grandes affaires signées vont continuer de porter l'activité sur notre marché domestique.

Pour en revenir à la France, quelques mots sur la présence et l'organisation de Bouygues Travaux Publics dans notre pays.

C'est avec le démarrage de la construction de la centrale de Bugey en 1972, son premier projet d'envergure nationale, que Bouygues Travaux Publics Grands Travaux France a fait son entrée dans le club des majors reconnus sur l'ensemble du territoire hexagonal. ▶

© VALODE & PISTRE

4



© LAURENT CARTE

5



En effet, son savoir-faire technique, juridique et financier, ainsi que sa capacité à mobiliser rapidement puis à fédérer et manager des équipes pluridisciplinaires, en font aujourd'hui un acteur incontournable sur les gros projets de Travaux Publics partout en France.

Au niveau de l'Île-de-France proprement dite, dont le PIB est équivalent à celui de l'Espagne, Bouygues Travaux Publics Région Parisienne, forte de 300 collaborateurs, est implantée depuis plus de 35 ans avec une école de formation à Challenger, dans les Yvelines. Cette entité opérationnelle a pour objectif de mettre au service des maîtres d'ouvrage franciliens une organisation, des prestations et des moyens adaptés aux spécificités des marchés et des interventions en région parisienne.

À partir des métiers des Travaux Publics, Bouygues Travaux Publics Région Parisienne propose son expertise dans l'intervention sur des infrastructures en exploitation et la maîtrise des opérations intégrant des process industriels, les opérations effectuées en milieu urbain dense et le management de projets multimétiers ou relevant de plusieurs maîtres d'ouvrages, enfin, les opérations complexes à forte valeur ajoutée technique nécessitant des moyens d'études et de calculs importants.

Quant à Bouygues Travaux Publics Régions France, il s'agit d'une société née le 1^{er} juillet 2010 de la fusion de l'ensemble des équipes d'ouvrages d'art France de Bouygues Entreprises France-Europe.

Avec 600 collaborateurs répartis dans toute la France (hors Île-de-France), Bouygues Travaux Publics Régions France assure un maillage du territoire

et une relation de proximité avec ses clients à qui elle propose son expertise sur les ouvrages à forte technicité, les ouvrages mixtes, les ouvrages spéciaux, les travaux de Terrassement d'Ouvrages d'Art et Rétablissement de Communication (TOARC) et les projets linéaires. Cette entité comprend deux directions spécifiques « métiers » : VSL France (spécialisée en précontrainte, réparations, renforcement d'ouvrages) et TFM (Travaux Fluviaux et Maritimes).

Avant de passer aux travaux en souterrain, quels sont les grands chantiers de surface auxquels participe actuellement Bouygues Travaux Publics en France ?

Ils concernent à la fois des ouvrages maritimes, routiers et ferroviaires.

Le premier d'entre eux est le viaduc de la Nouvelle Route du Littoral à La Réunion. Ce projet majeur, magnifique, réalisé en mer ouverte, a plusieurs caractéristiques qui en font un ouvrage d'art complexe et exceptionnel. Les voussoirs préfabriqués ont une largeur de quasiment 30 m et un poids de 250 t. Ils sont mis en place par des outils d'une dimension rarement atteinte : le lanceur a une longueur de 278 m et un poids de 2 800 t. Il en est de même des piles également préfabriquées qui sont installées en deux morceaux à l'aide de la barge auto-élévatrice géante « Zourite », spécialement construite pour ce projet. Les travaux se déroulent dans une mer hostile avec des houles et des vents cycloniques, ce qui justifie le choix de la préfabrication intégrale.

Le deuxième ouvrage majeur est l'extension en mer de 6 hectares de Monaco par la réalisation du nouvel éco-quartier de l'Anse du Portier. La technique choisie pour réaliser l'infrastructure

maritime est celle d'un remblai confiné par une ceinture de 18 caissons trapézoïdaux en béton armé hauts de 27 m et pesant 10 000 t chacun, munis de chambres d'amortissement. Les caissons sont préfabriqués dans un caissonnier installé dans le bassin Est du port de Marseille, de 56 m de long, 50 m de large et 27 m de haut qui constitue une première en France. Il permettra de préfabriquer les 18 caissons qui seront ensuite mis en flottage et remorqués par voie maritime jusqu'à Monaco.

Le projet présente par ailleurs un caractère éminemment écologique sur lequel il faut insister : la protection de l'environnement, la préservation de la biodiversité - avec la proximité de la réserve du Larvotto et le tombant des Spélugues - et le respect du voisinage, des sites et des paysages qui font l'objet d'une attention de tous les instants. À titre d'exemple, nous avons transplanté 500 m² de posidonie⁽¹⁾ qui

se trouvaient sur le site à remblayer et nous les avons réimplantés dans des zones de part et d'autre de l'extension. L'éco-quartier bénéficiera de certifications environnementales reconnues telles que HQE Aménagement, BREEM⁽²⁾ et Label Port Propre.

Le troisième projet que je souhaite évoquer est l'extension du port de Calais. Le projet consiste ainsi à réaliser une digue de plus de 3 kilomètres, à terrasser par dragage le fond du futur bassin, et à utiliser les matériaux issus de ces dragages pour construire de nouveaux terre-pleins gagnés sur la mer en les stockant derrière des digues provisoires.

La digue principale servira à protéger la navigation et les équipements du port à l'intérieur d'un bassin de 90 hectares navigables. Sa carapace composée de 16 000 Xblocs[®] est conçue pour résister aux tempêtes et à la montée des eaux dans les cent prochaines années. Le projet comprend aussi toute l'infrastructure nécessaire à l'accueil du trafic transmanche : 65 hectares de plateformes et de voiries, dont 45 gagnés sur la mer, ainsi que les bâtiments nécessaires à l'exploitation et à l'accueil sécurisé des clients du port. Ces trois projets mixent à la fois des ouvrages d'art et des ouvrages maritimes. Ils sont représentatifs de l'une des valeurs ajoutées que sait apporter Bouygues Travaux Publics en réalisant des ouvrages à la mer, une technique que nous mettons d'ailleurs en œuvre depuis très longtemps, en combinant les techniques *offshore* et celles de génie civil.

Dans un tout autre registre, Bouygues Travaux Publics intervient, à terre, sur des ouvrages ferroviaires et routiers.

6- La tête du tunnelier mis en œuvre pour la ligne Ouest-Est du tramway de Nice.

7- Chantier du prolongement vers le nord de la Ligne 14 du métro parisien.

8- La phase 2 de prolongement de la Ligne 3 du métro du Caire.

9- Tunnel routier bitube de Liantang au nord-est de Hong Kong.

© YVES CHANOÏT

6



© CÉLINE CLANET

7



Quelques mots sur les deux opérations en cours que sont le contournement de Nîmes-Montpellier et la liaison L2 à Marseille.

Maillon du futur axe ferroviaire européen reliant le sud de l'Espagne à l'Europe centrale, le projet de contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier représente la première ligne mixte - fret et voyageurs - en France. Longue de 80 km (dont 60 km de LGV), la ligne a nécessité la construction de 188 ouvrages d'art, dont 110 ouvrages hydrauliques afin de garantir la transparence hydraulique.

L'autoroute A507 ou rocade L2 est une autoroute urbaine à Marseille devant constituer à terme un contournement du centre-ville entièrement autoroutier, sans péage et accessible aux poids-lourds (sauf matières dangereuses) en reliant l'autoroute Nord (A7) à l'autoroute Est (A50) en 9,7 kilomètres. Ce « L » traverse les quartiers Nord et les quartiers Est de Marseille. Le chantier nous a été confié par l'État dans le cadre d'un PPP.

La partie Est a été ouverte en décembre 2016. La partie Nord, créée de toutes pièces en site urbain ouvrira courant 2018.

Dans le domaine des travaux souterrains, quelles opérations pouvez-vous mettre en évidence qui relèvent de l'entité opérationnelle Bouygues Travaux Publics Grands Travaux France ?

On peut commencer par le sud avec la nouvelle ligne Ouest-Est du tramway de Nice qui est en partie aérienne et en partie souterraine. Bouygues Travaux Publics réalise, en conception/construction, la section enterrée de cette ligne de 11,3 km qui comprend un tunnel de 3,2 kilomètres et de 9 m

INTERNATIONAL : 6 CHANTIERS DE RÉFÉRENCE EN COURS

Parmi les projets en cours, plusieurs d'entre eux à l'international mettent en lumière la diversité des contextes dans lesquels intervient Bouygues Travaux Publics.

MÉTRO DU CAIRE (ÉGYPTE)

Dans la continuité de la phase 2 de la Ligne 3 à partir de la station Haroun et en direction de la zone aéroportuaire, la nouvelle phase de travaux (Phase 4A) comprend 5,15 km de tunnel et 5 stations enterrées sur la Ligne 3 qui traverse la capitale égyptienne d'est en ouest. (Maître d'ouvrage : Ministère Égyptien des Transports - Entreprise : Bouygues Travaux Publics).

NORTHCONNEX (AUSTRALIE)

Conception/construction de deux tunnels de trois voies chacun d'une longueur totale de 9 km. Ce tunnel bitube dans Sydney permettra de raccorder l'ouest au nord de la mégapole : il reliera les deux autoroutes M1 (Sydney-Newcastle, à 160 km au nord) et M2 (axe de contournement de Sydney du nord-ouest au nord-est). (Maître d'ouvrage : Transurban - Entreprise : Bouygues Construction Australia).

TUNNEL DU MÉTRO DE MELBOURNE (AUSTRALIE)

Conception-réalisation du projet du métro de Melbourne comprenant un tunnel bitube ainsi que les cinq stations du projet (Arden, Parkville, CBD North, CBD South, Domain).

Le contrat, dans le cadre d'un PPP, prévoit la construction d'un tunnel bitube d'une longueur de 9 kilomètres, 5 nouvelles stations ainsi que l'aménagement de parcs, passerelles, zones piétonnes et commerces dans les espaces publics autour de ces stations. (Maître d'ouvrage : Cross Yarra Partnership - Entreprise : Bouygues Construction Australia).

HONG KONG (CHINE)

Plusieurs projets de travaux souterrains sont en cours à Hong Kong :

EXTENSION DU MÉTRO SHATIN TO CENTRAL LINK

2x2 tunnels destinés à équiper l'extension de 6 km de la ligne de métro Shatin to Central Link, qui passeront sous des quartiers très animés, assurant la liaison entre des sites touristiques et le quartier d'affaires. (Maître d'ouvrage : Mass Transit Railway Corporation - Entreprise : Dragages Hong Kong/Bouygues Travaux Publics).

TUNNEL DE LIANTANG

Conception-construction de deux tunnels routiers de 4,8 km chacun, de leurs bâtiments de ventilation associés et d'un bâtiment administratif. (Maître d'ouvrage : Gouvernement de Hong Kong - Entreprise : Dragages Hong Kong).

TUNNEL ROUTIER SOUS-MARIN TUEN MUN - CHEK LAP KOK

Réalisation des travaux de construction d'un tunnel sous-marin bitube à 50 m sous la mer, chaque tube comportant deux voies et mesurant 14 m de diamètre. Ce tunnel d'une longueur de 4,2 km, reliera les Nouveaux Territoires, au nord de Hong Kong, à l'île de Lantau, sur laquelle se situe l'aéroport international. (Maître d'ouvrage : Gouvernement de Hong Kong - Entreprise : Dragages Hong Kong, Bouygues Travaux Publics).

de diamètre, creusé à une profondeur de 20 à 25 m et quatre gares enterrées.

Permettre une desserte efficace du centre-ville et préserver le patrimoine architectural sont les deux objectifs essentiels qui ont motivé le creusement d'un tunnel pour le passage du tramway Ouest-Est.

L'entreprise met en œuvre un tunnelier à pression de boue Herrenknecht dans une géologie complexe et un milieu urbain très dense avec des bâtis pour certains très anciens, avec un tracé qui longe le front de mer, partant du Vieux Port pour se développer jusqu'à l'aéroport, avec la volonté d'utiliser la mer comme voie pour évacuer les déblais. C'est ainsi que toutes les installations de chantier et notamment la station de traitement des boues MS sont situées sur le Vieux Port de Nice, et font l'objet d'un traitement architectural. L'évacuation des matériaux est assurée par une flotte de 240 barges en direction de Fos-sur-Mer.

En remontant vers Paris, les opérations ne doivent pas manquer, compte-tenu de l'importance des projets en cours dans et autour de la capitale ?

Bouygues Travaux Publics participe en effet à quatre chantiers parisiens dont trois font partie intégrante du Grand Paris Express.

Le premier concerne le prolongement vers le Nord de la Ligne 14 qui constitue la première étape du métro automatique du Nouveau Grand Paris, de Saint-Lazare à Mairie-de-Saint-Ouen avec quatre nouvelles stations.

Les travaux sont réalisés sous maîtrise d'ouvrage RATP à l'aide d'un tunnelier NFM à pression de terre, à partir d'un puits dit « Glamer » à l'intérieur ▷

© FRÉDÉRIC SAUTERAU

8



© DR

9



duquel il est monté puis démonté à trois reprises pour réaliser les trois branches du prolongement : 1 400 m vers la station de Mairie-de-Saint-Ouen, au nord, 500 m entre le puits Glamer et le SMR⁽³⁾, 300 m vers la station de Clichy - Saint-Ouen.

Un autre chantier tout aussi important est celui du prolongement d'Éole vers l'ouest, dont le lot qui nous est attribué se développe entre la gare Saint-Lazare et 900 m avant le CNIT, c'est-à-dire sur une longueur d'environ 6 kilomètres incluant la réalisation en souterrain de la gare Porte-Maillot. Le tunnelier Herrenknecht utilisé ici est de type à pression de boue.

La réalisation de la gare Porte-Maillot est extrêmement complexe puisque l'ouvrage se situe entre le boulevard périphérique, les Lignes 1 du métro et A du RER, le parking du Palais des Congrès et son passage souterrain d'accès se développant sous la Porte Maillot elle-même.

Quant aux trois autres chantiers parisiens de Bouygues Travaux Publics ?

Ils sont liés aux travaux de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express entre Pont-de-Sèvres et Fort-d'Issy-Vanves-Clamart pour le lot T3A et entre Villejuif-Louis-Aragon et Créteil-l'Échat pour le lot T2A.

De plus, nous avons également réalisé le premier chantier du Grand Paris Express avec, en particulier, le ripage de la dalle de couverture de la gare Fort-d'Issy - Vanves - Clamart en août dernier. En effet, il s'agissait de concevoir la gare du nouveau métro sous les voies du Transilien, tout en maintenant celles-ci opérationnelles. Son ripage a représenté le point d'orgue du chantier car il conditionnait l'ensemble du

planning des travaux de génie civil⁽⁴⁾. Le lot T3A est réalisé à l'aide d'un tunnelier à pression de terre. Une caractéristique de ce lot est que la gare de Pont-de-Sèvres, bien qu'à ciel ouvert, est implantée à cheval sur la RD1 et sur la Seine, ce qui n'en simplifie pas la réalisation.

Pour le lot T2A, Bouygues Travaux Publics met en œuvre trois tunneliers mixtes TBM à densité variable (pression de terre et pression de boue). Nous avons été parmi les premiers à expérimenter et mettre en œuvre avec succès cette technique sur le chantier du tunnel routier sous-marin bitube du port de Miami ainsi que sur le projet SCL 1128 à Hong Kong, l'un des lots de la future ligne souterraine du métro faisant le lien entre Shatin et Central Link.

Dans le cas du lot T2A, la mise en œuvre de tunneliers TBM nous permet de traiter l'ensemble des déblais des trois tunnels à partir d'une centrale unique à partir de laquelle ils sont évacués.

Qu'il s'agisse d'Éole ou du Grand Paris Express, les travaux réalisés en milieu urbain très dense et à des profondeurs conséquentes sont significatifs de la volonté de Bouygues Travaux Publics d'apporter une valeur ajoutée dans ses réponses aux appels d'offre en proposant des variantes tant au niveau de la conception des ouvrages que des solutions techniques d'exécution.

Dans le cas d'Éole, en particulier, nous avons optimisé le processus d'évacuation des déblais afin de le réaliser par voie fluviale, en les transportant dans des conduites via Courbevoie pour les acheminer jusqu'à une station de traitement installée sur une estacade aménagée sur la Seine. Plus généralement, d'ailleurs, une grande majorité des déblais des lots T2A et T3A sera

évacuée par la Seine. Il en est de même sur le chantier de prolongement de la Ligne 14 ainsi que sur celui de la ligne Ouest-Est du tramway de Nice. Finalement tous nos projets souterrains évacuent leurs déblais par voie fluviale ou maritime.

Pour conclure avec une projection sur l'avenir ?

En guise de conclusion, je voudrais insister sur un constat et un enjeu. Le constat est que notre performance économique en 2016 et 2017 a été satisfaisante et que les perspectives d'activité sur les trois prochaines années sont bonnes.

Cette performance à l'international, au Caire, à Hong Kong, en Australie, mais aussi en France, dans la réalisation régulière de tunnels dans des conditions souvent difficiles nous a permis de mutualiser les acquis techniques et de progresser en termes d'innovations et d'industrialisation. La concentration des chantiers pour le Grand Paris nous offre l'occasion de mettre à profit l'ensemble de ces acquis en bénéficiant de l'effet d'échelle.

L'enjeu est triple.

D'abord, l'activité « Tunnels et ouvrages souterrains » est en surchauffe en France : cela nécessite un important effort de formation que nous sommes en train de mener. Nous devons également porter une grande attention à la gestion des risques et à la supervision des projets.

Ensuite, nous avons clairement l'objectif de sortir d'ici une quinzaine d'années de cet ensemble de projets en étant transformés : nous devons avoir amélioré et industrialisé nos *process* dans le domaine des travaux souterrains mais également avoir développé de nombreuses innovations que nous portons : l'une des meilleures illustrations est le simulateur de pilotage de tunnelier - une première mondiale - que nous avons présentée lors du dernier congrès de l'AFTES, et que nous proposons à la profession pour faire face à la montée en puissance des projets. Enfin, pour répondre aux besoins en matière d'infrastructures, il faudra - demain - creuser de plus en plus profond et limiter l'impact de nos activités en surface. À nous de penser différemment et de proposer à nos clients des solutions créatives qui sortent du cadre. C'est à ce prix que nous conserverons notre leadership en matière de tunnels et d'ouvrages souterrains. □

10- Connexion autoroutière bitube « North Connex » dans Sidney, raccordant l'ouest au nord de la mégapole, en Australie.

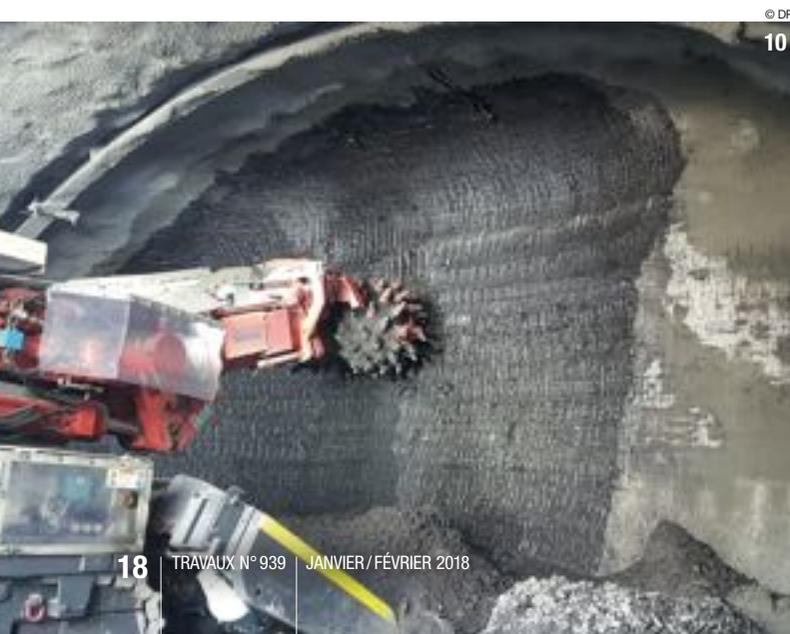
11- Contournement de Nîmes-Montpellier.

1- La posidonie est une plante sous-marine et non une algue. Elle fleurit sous la mer et forme de vastes herbiers indispensables à l'écosystème marin de la Méditerranée.

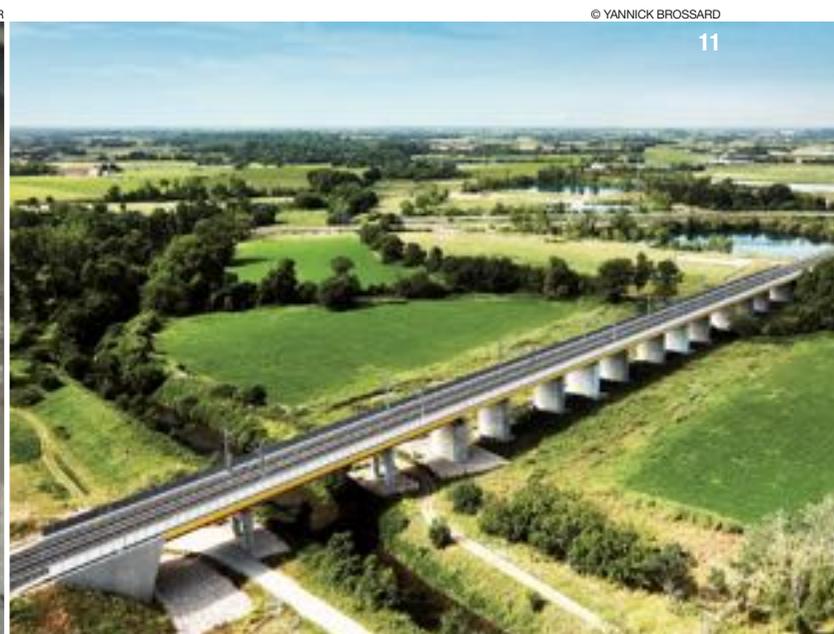
2- BREEAM est le standard de référence en termes de construction durable et est devenu la méthode d'évaluation utilisée de facto pour décrire la performance environnementale d'un bâtiment.

3- SMR : Site de Maintenance et de Remisage.

4- Chantier réalisé par le groupement Bouygues Travaux Publics/Soletanche Bachy.



© DR
10



© YANNICK BROSSARD
11

Vivre le progrès.



Venez nous rencontrer à :

Intermat 2018

Paris, du 23 au 28 avril
Stand: E6-B-056



Les pelles sur pneus de Liebherr

- Rentabilité maximale grâce à des technologies d'avenir
- Des machines développées dans l'optique d'une productivité maximale
- Composants de qualité fabriqués dans les usines du groupe
- Poste de travail ergonomique confortable pour une productivité haute et constante

Liebherr-France SAS
2, Avenue Joseph Rey, B.P. 90267
68005 Colmar Cedex
Tel. : +33 3 89 21 30 30
E-mail : info.jfr@liebherr.com
www.facebook.com/LiebherrConstruction
www.liebherr.com

LIEBHERR

INTÉGRER LE DESSUS ET LE DESSOUS DE LA VILLE

PARIS A ACCUEILLI EN NOVEMBRE 2017 LE 15^e CONGRÈS DE L'AFTES QUI S'EST DÉROULÉ DANS UN CONTEXTE OPTIMISTE EN RAISON DE L'IMPORTANCE DES TRAVAUX SOUTERRAINS ACTUELLEMENT EN COURS DANS LA CAPITALE ET AUTOUR D'ELLE AINSI QUE DANS PLUSIEURS VILLES DE PROVINCE EN FRANCE. **ENTRETIEN AVEC YANN LEBLAIS, PRÉSIDENT DE L'AFTES.**

PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



PLUS QUE JAMAIS, LE CONGRÈS DE L'AFTES A CONTRIBUÉ À PROMOUVOIR « L'ESPACE SOUTERRAIN » ET À SOUTENIR LES ACTIONS ORGANISÉES POUR LE FAIRE CONNAÎTRE, TANT EN FRANCE QU'À L'INTERNATIONAL. YANN LEBLAIS, PRÉSIDENT DE L'AFTES DEPUIS 2011, REVIENT SUR LES ACTIONS ENTREPRISES DANS CETTE OPTIQUE ET SUR L'ÉTAT ET L'ÉVOLUTION DU MARCHÉ TELLE QU'IL SE PRÉSENTE EN FRANCE EN 2017.

Quel bilan pouvez-vous dresser de l'évolution de l'AFTES et de son influence dans le secteur des travaux souterrains alors que vous approchez de la fin de votre deuxième mandat de président de l'association ?

Depuis ma première élection en 2011, l'action de l'équipe de l'AFTES s'est inscrite dans le prolongement de celle de mes prédécesseurs : renforcer la visibilité des espaces souterrains tout en maintenant ce qui constitue nos racines, l'élaboration de la doctrine technique et sa mise à la disposition

de tous. Mais aussi augmenter notre visibilité à l'international et rajeunir les forces vives pour assurer la pérennité de nos actions.

Peut-être est-il utile de rappeler en préambule que l'AFTES a une particularité historique : celle de regrouper l'ensemble des intervenants à l'acte de programmer puis construire et exploiter des ouvrages sous le niveau du sol : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et ingénieries, architectes, entreprises de travaux et équipementiers, acteurs institutionnels tel le CETU⁽¹⁾, universités et exploitants.



Ce point est très important : l'AFTES est un forum d'échanges sans exclusive et une plate-forme qui intègre et restitue les avis de tous les acteurs de la chaîne. C'est tout sauf la défense étroite d'intérêts particuliers.

Autrefois « Association Française des Travaux en Souterrain », elle est devenue en 2005 l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain. Ce changement d'appellation a marqué une évolution forte : pour schématiser, il ne suffit pas d'améliorer et de promouvoir les techniques de réalisation et les modalités contractuelles des travaux en souterrain mais il convient aussi d'être en mesure de sensibiliser puis de convaincre les décideurs et l'opinion publique d'utiliser cette richesse que constitue le sous-sol, en particulier en site urbain.

Pour revenir à votre question, le bilan est positif et le succès récent de notre congrès en est une forte démonstration. Mais nous y reviendrons.

L'un des objectifs en 2011 était d'attirer des jeunes au sein des diverses instances de l'AFTES. Il est rempli. Soyons lucides : les jeunes, avec l'aval de leurs employeurs, rejoignent les rangs de l'AFTES parce qu'il y a aussi un marché en croissance.

Pour quelles raisons faites-vous un distinguo entre travaux souterrains et espace souterrain ?

La notion de travaux souterrains est historiquement associée aux réseaux de transport de toutes natures - rail, route, eau, effluents, voire parkings... - et à leur construction alors que celle d'espace souterrain, plus récente, est consubstantielle à la ville durable.

Développer les espaces en souterrain est un moyen puissant pour maîtriser le développement urbain.

YANN LEBLAIS : DATES-CLÉS

1975-1976 : diplôme de l'ESTP puis du CHEBAP (Centre des Hautes Études du Béton Armé et Précontraint).

1979 : rejoint Simecsol.

1999 : président de EEG Simecsol qui devient Arcadis France en 2002.

2009 : Global Director Infrastructure du Groupe Arcadis.

2001-2005 : Président de la Fédération française de l'Ingénierie (Syntec-Ingénierie).

2005-2008 : Président de la Fédération Européenne de l'Ingénierie (EFCA).

2007-2010 : vice-président de l'AITES/ITA (Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain).

2012-2014, 2015-2017 : Président de l'AFTES.

1- Yann Leblais, président de l'AFTES.

2- Mise en place de l'étanchéité dans la galerie de reconnaissance du Lyon-Turin (Spie batignolles).

3- À Hong Kong, le tunnel entre Liantang et Heung Yuen Wai Boundary Control Point fait appel à plusieurs méthodes de creusement : tunnelier et abattage en traditionnel à l'explosif (Dragages Hong Kong).

4- Collecteur d'assainissement avec vousoirs en fonte à La Courneuve, en Seine - Saint-Denis.

5- Au Qatar, l'un des tubes de la ligne rouge du métro de Doha (Vinci Construction).

Comme vous le savez, 70 % de la population mondiale sera urbaine en 2050 et les besoins induits sont immenses à satisfaire.

L'espace souterrain permet de bien répondre à la densification et à la résilience de la ville, redéployer des espaces en surface, intégrer le dessus et le dessous de la ville, le tout avec une création de foncier urbain donc de richesse. C'est en outre un parti qui contribue à une meilleure efficacité énergétique du fait de la grande inertie thermique du sous-sol.

Dans cette optique d'élargissement du champ d'action de l'AFTES, comment les grands sujets du moment sont-ils traités ?

Dans notre association, le comité technique et le comité espace souterrain sont les deux piliers de la constitution de la réflexion et de la doctrine.

Notre revue TES et le congrès en sont les vecteurs de diffusion.

Le comité technique, qui regroupe environ 300 membres pour 20 groupes de

travail actifs, est chargé de faire progresser la connaissance dans les divers domaines des travaux souterrains.

Le comité espace souterrain a pour vocation de promouvoir une utilisation intelligente de l'espace souterrain, notamment en site urbain. Il présente ainsi la particularité de regrouper aussi des aménageurs - urbanistes et architectes, notamment.

Ce comité a été l'incubateur d'une réflexion pour structurer cet apport de doctrines et de pensées qui a débouché sur le projet national baptisé « Ville10D ».

Ce projet a pour but de contribuer à l'élaboration et la concrétisation de réflexions sur l'utilisation de l'espace souterrain, en traitant en particulier ses aspects sociaux et réglementaires mais aussi son acceptation par le grand public, pour un développement urbain durable.

Quelle a été la ligne directrice de ce 15^e congrès ?

Le congrès tous les trois ans est un outil de positionnement pour l'AFTES et ses idées qui combine une plate-forme de développement d'activités économiques entre les acteurs de la filière et une conférence technique.

Il est aussi essentiel pour les ressources financières de l'association. Dans la droite ligne des évolutions évoquées plus avant, le thème général de cette édition parisienne était « l'espace souterrain, notre richesse ».

Il a mis l'accent sur la valeur latente que représente le sous-sol dans le développement de nos espaces de vie, en particulier dans l'aménagement des villes. Il couvrait également le foisonnement et la nécessaire imbrication des savoirs et des métiers pour une vie durable de ces espaces. ▷

© BESSAC



© CYRIL DUPONT



Outre les trois jours d'un congrès classique, cette édition a consacré une quatrième journée aux stratégies de développement en souterrain de la ville, avec une mise en perspective des développements en cours en région parisienne à l'aune de l'expérience de Singapour.

Le 15^e congrès s'est donc ouvert, plus encore que par le passé, à l'international.

Beaucoup plus ! D'abord, nous avons fait de Singapour l'invité d'honneur du congrès. En effet, Singapour est, de longue date, la ville la plus avancée, tant conceptuellement que pratiquement, dans le développement des espaces souterrains. Nous avons été très honorés par la présence d'une forte délégation singapourienne, menée par Alan Shan, le Chairman du LTA (Land Transport Authority), accompagné par l'Ambassadeur de Singapour à Paris.

La participation étrangère a clairement été tirée par le dynamisme des travaux souterrains en France, notamment les chantiers du Grand Paris Express, du Lyon-Turin, du prolongement d'Éole vers l'ouest de Paris et du projet Cigeo d'enfouissement des déchets radioactifs. Et puis Paris reste Paris !

Nous avons aussi accueilli l'association mondiale AITES/ITA dont nous sommes un des membres fondateurs et dans laquelle nous nous investissons. Elle a réuni à Paris son comité sécurité d'exploitation ITA-COSUF, son Bureau et la cérémonie des ITA Tunnelling Awards.

Le succès a-t-il été au rendez-vous ?

Oui, clairement ! Avec 75 articles présentés dans deux sessions parallèles toujours comblés, 150 exposants sur

L'AFTES EN BREF

Forte d'environ 940 membres, collectifs et individuels, l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES), créée en 1972, a pour objet de rassembler et mobiliser tous les acteurs de la filière, investisseurs, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et ingénieries, bureaux d'études et de contrôle, consultants, architectes, urbanistes, entrepreneurs de travaux, équipementiers, universitaires, etc. dans le but de :

- Promouvoir l'Espace Souterrain et soutenir toutes les actions qui contribuent à le faire connaître,
- Faire progresser la connaissance dans ses domaines de compétence,
- Entretenir l'apport technique et la production de doctrine, en ciblant les besoins prioritaires de ses membres et en intégrant les enseignements d'une veille technique accrue,
- Échanger entre ses membres et diffuser le plus largement possible les recommandations de ses groupes de travail et plus généralement toutes les informations techniques, contractuelles, sociales, environnementales dont elle dispose,
- Aider au développement et à la diffusion du savoir-faire des acteurs français,
- Accroître l'intérêt des jeunes ingénieurs et techniciens du BTP pour les métiers du souterrain.

200 stands, 4000 délégués et visiteurs sur les trois jours dont de nombreux jeunes, 200 participants à la 4^e journée, 400 participants au dîner de gala et 65 nationalités.

Je rappelle ici que ce succès est une œuvre collective, de longue haleine, menée par des bénévoles que je remercie chaleureusement pour leur mobilisation de tous les instants.

Quelles évolutions des techniques dans l'aménagement souterrain en France et dans le monde pouvez-vous mettre en évidence ?

L'évolution des tunneliers et des équipements conçus pour la foration des ouvrages et la réalisation de revê-

tements est remarquable. Au risque d'un mauvais jeu de mots, les tunneliers ont fait leur révolution tant en ce qui concerne les diamètres de forage, voire leur forme qui peut être carrée, que la maîtrise de la grande variété des terrains dans lesquels ils évoluent.

La mécanisation des processus englobant le creusement des ouvrages annexes répétitifs, tels que les rameaux, est en cours.

Pour tous les matériels, l'utilisation généralisée des technologies de l'information a permis une amélioration incontestable en termes de productivité et de fiabilité des travaux d'excavation.

L'intégration des données devrait déboucher rapidement sur le pilotage

à distance, voire automatisé, de l'ensemble de ces matériels.

Il n'en reste pas moins qu'il convient, pour y parvenir, de maîtriser en temps réel la connaissance du terrain à l'avant des machines, sans doute grâce à l'amélioration, déjà en progrès, de la fiabilité des techniques de reconnaissance non destructives.

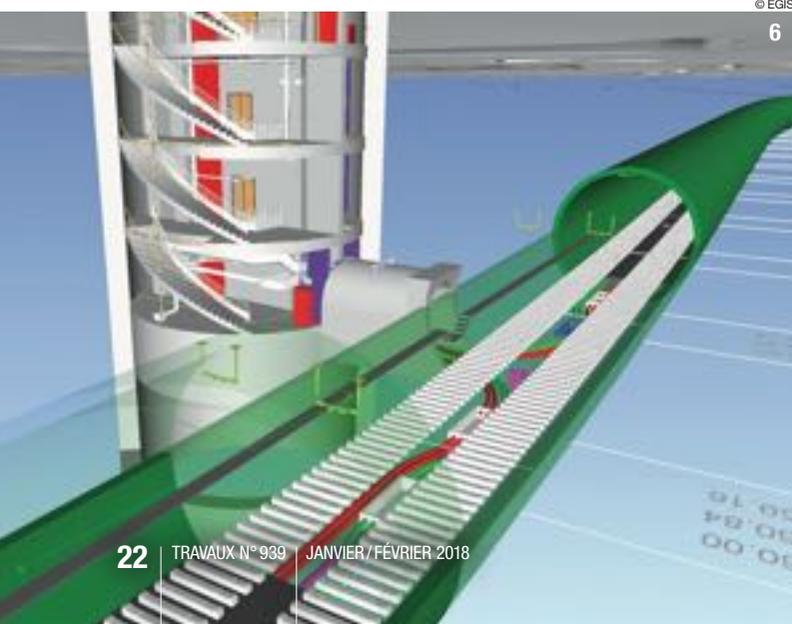
La maîtrise des outils numériques est devenue essentielle. Cependant, elle n'est qu'un moyen car la compréhension de la complexité des phénomènes impliqués dans les travaux de creusement de tunnels restera, en grande part, un acquis de l'expérience.

Avez-vous mis en œuvre des actions spécifiques pour aider les jeunes à se diriger vers le secteur des travaux en souterrain ?

À l'échelle du monde, le marché est gigantesque car lié au développement urbain : transports, eaux, énergie. Sans attendre le développement actuel du marché français, nous avons créé dès 2010 un comité éducation en vue d'attirer les jeunes vers les métiers du souterrain et de favoriser la formation professionnelle, en assurant un lien permanent avec les milieux universitaires.

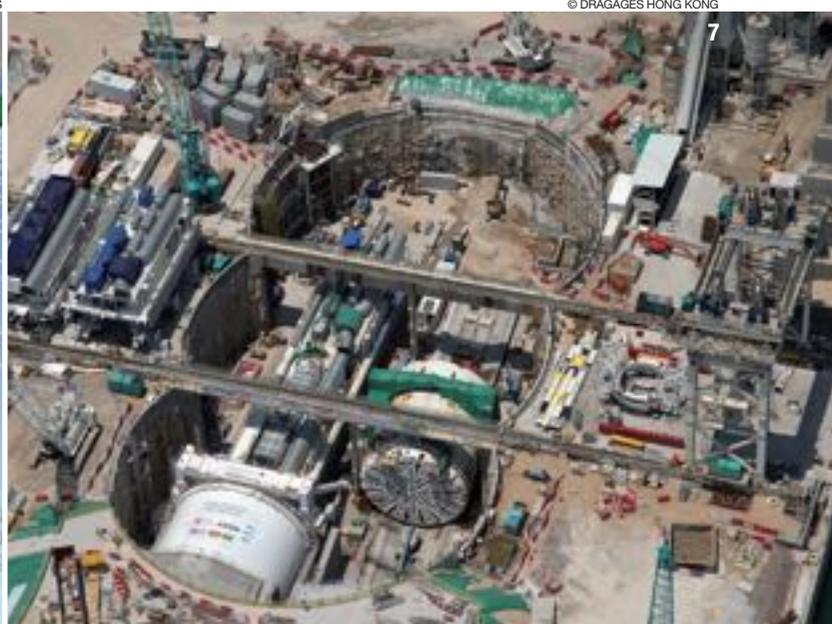
En 2011, l'AFTES a mis en place à Lyon un master à dominante francophone, de niveau bac+6, reconnu par l'université sous l'égide de l'INSA de Lyon et de l'ENTPE, pour délivrer un savoir approfondi dans le domaine des travaux souterrains. Les professeurs français et étrangers sont tous des praticiens et pour beaucoup des membres actifs de l'AFTES.

La réputation de ce master a franchi rapidement nos frontières et s'est placée en concurrence des quelques formations similaires en Suisse, Italie ou Asie.



© EGIS

6



© DRAGAGES HONG KONG

7

L'ensemble de ces actions a-t-il déjà eu des effets sur l'attrait que la filière des travaux souterrains peut exercer sur les jeunes ?

Au-delà de leur appétence technique, les jeunes sont d'abord attirés par des secteurs dans lesquels il y a un avenir économique.

6- Modélisation d'un tunnel pour le Grand Paris Express (Egis).

7- L'un des ouvrages de départ du chantier du tunnel sous-marin de Tuen Mun-Chek Lap Kok Link à Hong Kong (Dragages Hong Kong/Bouygues Travaux Publics Exploitation Internationale).

8- Prolongement du RER E à l'ouest (Éole) : perspective d'étude de la gare de Porte Maillot, assurant la liaison entre la ville du dessus et la ville du dessous (Agence Duthilleul - AREP/illustrateur : Studio Grenade).

9- Gare Villejuif - Louis Aragon de la future Ligne 15 Sud : le Grand Paris Express est l'occasion de bâtir une nouvelle génération de gares qui vont contribuer au développement des territoires desservis.

LES 10 LAURÉATS DES ITA TUNNELLING AWARDS 2017

L'International Tunneling and Underground Space Association (ITA) a organisé la troisième édition des ITA Tunnelling Awards à Paris lors du 15^e congrès de l'AFTES, le 15 novembre 2017.

LES 10 LAURÉATS SONT LES SUIVANTS

- **Projet majeur de l'année (plus de 500M €) :** métro de Doha au Qatar.
- **Projet de tunnel de l'année (50-500M €) :** MTR Shatin à Central Link (SCL) - lot 1103 Hin Keng à Diamond Hill Tunnels - Hong Kong, Chine.
- **Projet de l'année (jusqu'à 50M €) :** centrale hydroélectrique de Fjærland - Norvège.
- **Projet d'innovation technique de l'année :** construction d'une section de bifurcation d'une voie express souterraine sous un quartier résidentiel de Yokohama - Japon.
- **Innovation produit/équipement technique de l'année :** surveillance de la résistance du béton projeté par imagerie thermique (SMUTI) - Royaume-Uni.
- **Initiative de durabilité de l'année :** projet de tunnel sous la rivière Anacostia - à Washington DC aux États-Unis.
- **Initiative de sécurité de l'année :** système de changement robotique à disques Telemach Cutterhead - Hong Kong, Chine.
- **Concept novateur de l'espace souterrain de l'année :** plan directeur des cavernes de Hong Kong (déblocage de ressources foncières cachées pour le développement urbain durable) - Hong Kong, Chine.
- **Jeune tunnelier de l'année :** Tobias Andersson - Norvège.
- **Prix des réalisations d'une vie :** Professeur Einar Broch, président de l'ITA de 1986 à 1989 et membre de Norwegian Academy Technology Sciences et de Norwegian Society Professional Engineers. Il est notamment reconnu pour ses contributions remarquables (plus de 100 publications scientifiques) concernant les installations hydroélectriques.

Leur degré d'intérêt - et celui de leurs employeurs potentiels - pour les travaux souterrains dépend d'abord de l'état du marché en France et du niveau d'activité des entreprises dans le domaine des travaux souterrains. En France le marché offre de grandes perspectives, avec une visibilité à 15-20 ans, ce qui ne s'était pas produit depuis très longtemps. À ceci s'ajoute la complexité qui va croissant dans nos domaines d'ac-

tivité et nécessite des compétences en regard. Et là nous retrouvons le maître.

De ce fait, la nature de la demande a-t-elle évolué ?

Jamais un tel volume de travaux neufs n'avait été à réaliser en France dans un délai aussi court. Une telle demande n'est pas sans conséquence sur l'organisation et les moyens conditionnant la réussite des chantiers. La compétence

humaine - et l'expérience que j'évoquais précédemment - le savoir-faire sont requis à leur niveau d'excellence, à tous les échelons de l'entreprise.

Dans les programmes, la demande est plus centrée sur la performance finale du service que sur la construction elle-même. L'intégration de la chaîne « conception, construction, exploitation » est une réalité. Lors du lancement d'un projet il est désormais impensable de ne pas y associer l'ensemble des parties prenantes à tous ses stades.

Toutefois, au-delà de ce programme de travaux neufs, en France comme dans tous les pays développés, la tendance de fond est aux travaux d'entretien et d'amélioration de l'existant. Les exigences de l'opinion publique et la simple bonne gestion d'un patrimoine vieillissant incitent à ne plus tolérer un manque de maintenance, tant pour des raisons de sécurité que d'économie d'exploitation.

Pour conclure, quels sont les nouveaux enjeux et les attentes des professionnels autour du thème "les défis en surface, les solutions en sous-sol" ?

Les enjeux sont clairement liés à la mobilisation pérenne des compétences requises pour faire face à la forte demande.

Les attentes de tous sont fortes sur la concrétisation par les décideurs politiques de leur nouvelle perception du développement urbain, à l'instar de ce que fait la Ville de Paris dans son dernier appel à projets. Elles le sont aussi, pour les professionnels, sur la visibilité à terme des programmes annoncés. □

1- CETU : Centre d'Études des Tunnels.

2- AITES : Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain.

© AGENCE DUTHILLEUL

8



© SGP

9





MS PRÉSERVER L'EAU DANS TOUTES SES UTILISATIONS

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

MS EST UNE ENTREPRISE FAMILIALE ANCRÉE EN AUVERGNE DEPUIS 40 ANS OÙ SON INDÉPENDANCE EST LE GAGE DE SA SOUPLESSE, DE LA TENUE DE SES ENGAGEMENTS ET DE SA PÉRENNITÉ. FORTE D'UNE ÉQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE INTÉGRANT LES ÉTUDES, LA CONCEPTION, LA FABRICATION ET LES SERVICES ASSOCIÉS, MS APPORTE DANS LE MONDE ENTIER DES SOLUTIONS SUR-MESURE DE SÉPARATION LIQUIDE/SOLIDE DANS TROIS DOMAINES D'ACTIVITÉ : L'INDUSTRIE MINÉRALE, LES TRAVAUX SOUTERRAINS, L'ENVIRONNEMENT. DANS L'OPTIQUE DES CHANTIERS LIÉS AU GRAND PARIS EXPRESS ET À ÉOLE, ELLE REVIENT PAR AILLEURS SUR LE MARCHÉ DES FONDATIONS SPÉCIALES OÙ ELLE ÉTAIT PRÉSENTE AU DÉBUT DES ANNÉES 90 AVEC UNE GAMME INÉDITE DE MATÉRIELS QUI VIENNENT D'ÊTRE PRIMÉS AU DERNIER SOLSCOPE. ALEXANDRE GUILLAUME, PRÉSIDENT DE MS, RETRACE LE PARCOURS DE L'ENTREPRISE AU TRAVERS DE QUELQUES CHANTIERS-PHARES ET PRÉSENTE SES PROJETS POUR L'AVENIR.

L'entreprise a fêté ses 40 ans en 2016. Elle a été créée en 1976 par Jean-Paul Guillaume avec pour objectif d'origine de proposer des solutions pour valoriser le sable, principalement pour l'industrie du béton et

des enrobés, par des techniques de tri et de lavage avec des systèmes de recyclage de l'eau utilisée à cet effet. Depuis, MS s'est développée autour des trois métiers évoqués en préambule. Elle conçoit, fabrique et installe

1- Mise en place des éléments de l'usine du chantier de la tour Odéon à Monaco.

des solutions de séparation liquide/solide qui lui ont permis de réaliser des chantiers en France mais aussi à Hong Kong, Glasgow, Londres, Istanbul, Miami, Le Caire et Sydney. Dans l'industrie minière, laver les

granulats et minerais est indispensable pour obtenir des matériaux prêts à l'emploi pour fabriquer du béton ou des enrobés mais entraîne une forte consommation d'eau.

Ce qui a évolué dans cette problématique tient à la raréfaction des gisements de sable de telle sorte que les besoins de transformation sont devenus plus techniques. Ils concernent désormais le traitement de roche masquée, criblage, lavage et préparation granulométrique pour reconstituer un équivalent de sable naturel.

Avec une large gamme d'outils qui s'adapte aux problématiques les plus diverses, MS propose des solutions pour recycler jusqu'à 98 % de l'eau de process tout en assurant la maîtrise des déchets solides, facilement transportables et valorisables (étanchéité de fond de bassin, fabrication de tuiles, kaolin ...).

2- Alexandre Guillaume, président de MS.
3- Chantier 1128 de l'extension de Shatin to Central Line à Hong Kong.



© MARC MONTAGNON

2

« MS » : DATES ET CHIFFRES CLÉS

1976 : création par Jean-Paul Guillaume de « Matériel de Sablière ».

1990 : développement à l'export en Europe, au Caire et en Asie. « Matériel de Sablière » devient « MS ».

2005 : Cécile et Alexandre succèdent à Jean-Paul Guillaume à la direction de l'entreprise.

2007 : la barre des 50 employés est franchie.

2010 : MS passe la barre des 20 millions d'euros de chiffre d'affaires et s'installe dans 1 800 m² de bureaux et 5 000 m² de nouveaux locaux à Veyre-Monton, dans le Puy-de-Dôme.

2015 : agrandissement des locaux existants avec la création de 1 330 m² d'ateliers supplémentaires.

2015 : Prix régional et national « Entrepreneur de l'année » catégorie business vert.

2015 : Intermat Innovation Awards : prix du développement durable.

2017 : Trophée de l'innovation Solscope 2017.

EN 2017, MS EN CHIFFRES C'EST :

1 000 installations dans de plus de 50 pays.

500 000 t de matériaux valorisés par jour.

1 000 000 m³ d'eau préservée par jour.

17 millions de m³ de terrains traités en respectant les contraintes géologiques et environnementales.

PLUS DE 40 RÉFÉRENCES MAJEURES EN TUNNELS SUR LES 5 CONTINENTS

Dans le domaine des travaux souterrains, MS conçoit et construit depuis 30 ans sur les cinq continents des usines de traitement et de régénération de la boue de forage mise en œuvre pour les tunneliers intervenant dans les sols peu consistants ou perméables nécessitant un marinage hydraulique.

« Nous sommes les seuls à proposer un système breveté de maîtrise de la qualité de la boue de forage en temps réel ce qui est capital pour la sécurité du creusement » explique Alexandre Guillaume.

En parallèle, ces usines transforment les boues usées en déblais compacts, facilement repris par des chargeuses et générant ainsi d'importantes quantités d'eau clarifiée qui peut ensuite être réutilisée dans le process ou rejetée dans le milieu naturel sans aucun risque.

« MS a accumulé dans le monde un savoir-faire et une expérience reconnus, indique Alexandre Guillaume, pour le traitement de boues de forage au travers notamment de trois références majeures dans le monde ces dernières années : les deux tunnels de 14 et 17,60 m de diamètre à Hong Kong pour le chantier Tuen Mun - Chek Lap Kok, ▷



© DRAGAGES HONG KONG

3



4



5

les deux tunnels de 15,43 m de diamètre du projet Chongming à Shanghai et le tunnel de 13,82 m sous le Bosphore (projet Eurasia). Plus loin, nous avons aussi fourni les stations de traitement des boues pour le tunnel de 14,87 m de diamètre de Groene Hart, aux Pays-Bas ou le tunnel de 14,20 m de diamètre de Lefortovo à Moscou. « Nous intervenons sur les chantiers complexes (confinement) et contraignants, mêlant instabilité du terrain à forer, perméabilité des matériaux et pression hydrostatique souvent élevée. L'enjeu est de savoir s'adapter à toutes les géologies en développant un savoir-faire flexible, modulaire et sur mesure ».

En matière d'environnement, enfin, troisième métier de MS, la grande majorité des chantiers de BTP (travaux souterrains, bâtiment, terrassement, etc.) et de nombreuses industries (chimie, sidérurgie, textile, papeterie, agro-alimentaire, ...) génèrent des effluents incompatibles avec le rejet en l'état dans le milieu naturel.

Dans ce secteur, l'entreprise apporte des solutions sur mesure, fixes ou mobiles, mêlant traitement physico-chimique et filtration pour traiter cette pollution. Ces solutions permettent de traiter des eaux chargées, issues de chantiers, de rejets d'industries, de recycler et valoriser des boues de curage ou les sols pollués, de maîtriser la pollution et la concentrer en matières inertes.

MS a récemment conçu un procédé innovant et unique primé aux Interat Innovation Awards 2015, permettant le traitement du chrome VI et du chrome total dans les eaux chargées issues des usines de fabrication de béton et applicable à l'univers des tanneries (voir encadré : chrome VI).



6

MS emploie actuellement 90 personnes et a réalisé en 2017 un chiffre d'affaires de 20 millions d'euros.

L'objectif d'ici quelques mois est d'embaucher entre 15 et 20 personnes supplémentaires. Depuis 2005, les deux enfants de Jean-Paul Guillaume, Cécile et Alexandre, ont pris en main les destinées de la société.

Son activité se répartit à 60% dans les travaux souterrains, 30% dans la transformation des matériaux de carrières et de sablières et 10% dans des solutions dédiées de traitement d'eau et des effluents industriels.

« Une telle activité s'applique dans le cadre de travaux souterrains, précise Alexandre Guillaume, mais elle trouve aussi un débouché pour

4- L'usine du tunnel sous la Queens River à New York.

5- L'usine du tunnel Avrasya sous le Bosphore à Istanbul.

6- Chantier du tunnel sous-marin reliant l'aéroport de Chep Lap Kok à Tuen Mun à Hong Kong. L'usine de traitement de Chep Lap Kok - 10 000 m² - est actuellement la plus grande au monde.

certain chantiers de construction, qu'il s'agisse de travaux publics ou de bâtiment. Ce fut le cas lors de la construction de la tour Odéon à Monaco, sur certains lots de terrassement de l'autoroute A89 à hauteur de Tarare, lorsque se posent des problèmes de maîtrise de la charge en matières minérales, de pH voire de traitement de métaux lourds sur des sites ou sols pollués ».

Les travaux liés au Grand Paris vont conduire à extraire 43 millions de tonnes de déblais provenant d'horizons géologiques diversifiés : marnes, calcaires, sables de Fontainebleau et de Beauchamp.

Ces déblais vont être utilisés de façon différente en fonction des ouvrages à la



© MS



© STÉPHANE NYS AIR TECH PHOTO

construction desquels ils seront utilisés. « Notre ambition est d'utiliser notre savoir-faire pour recycler le maximum de déblais en produits valorisés comme des sables pour les bétons par exemple, poursuit Alexandre Guillaume. Les demandes de nos clients ont évolué. Ils n'achètent plus seulement une machine mais une performance, c'est-à-dire au-delà du seul matériel qui reste indispensable, un choix de procédés pour obtenir la performance requise ».

7- Le chantier de l'un des lots de la MTR West Island Line 703 à Hong Kong.

8- L'usine pour le prolongement de la Ligne B du métro de Lyon.

9- La centrale à béton du chantier du port Calais 2015 équipée de l'installation MS de traitement du chrome VI.

DES USINES INTÉGRÉES AUX CHANTIERS

« La transformation des déblais en matériaux nobles assure le lien entre le métier d'origine de l'entreprise et l'actualité des chantiers d'aujourd'hui, remarque Alexandre Guillaume. C'est d'ailleurs une notion que la Société du Grand Paris a très nettement mise en évidence dans les appels d'offre des différents lots ».

« Ceci ne constitue d'ailleurs pas une nouveauté pour nous car nous l'avons

déjà réalisée, il y a plus de 20 ans déjà, lors d'un chantier de creusement de tunnel à Sydney et, plus récemment, sur le chantier des tunnels ferroviaires de Liefkenshoek en Belgique. Sur ce chantier mettant en œuvre deux tunnels de 8,40 m de diamètre, le groupement Locobouw regroupant Vinci et des partenaires étrangers (CFE, CEI et Wayss & Freitag) avait fait appel à MS pour assurer le retraitement de plus de 1,1 million de tonnes de sable extrait du forage ». ▶



© SFD 2016

CHROME VI : FAIRE DU JAMAIS VU AVEC DU DÉJÀ LÀ

Avec un fort investissement dans l'innovation, MS a élaboré et commercialisé un procédé innovant de traitement du chrome VI et du chrome total (substance présente dans les eaux chargées issues des usines de fabrication de béton et applicable aux univers des tanneries et du traitement de surface).

C'est un matériau que l'on trouve dans le ciment dans lequel il est dissous, invisible mais très cancérigène.

Le nouveau cadre législatif de rejet des eaux de centrales à béton impose depuis 2011 que la teneur en chrome VI de ces eaux soit limitée. Le problème était que le traitement mis en œuvre pour les eaux de surface ne pouvait pas être appliqué à l'univers alcalin des centrales à béton.

Dans ce contexte très particulier, il existe désormais une technique pour transformer le chrome VI très nocif en chrome III inoffensif.

En collaboration avec le CNRS, MS a trouvé un procédé très simple mais très efficace de traitement de ce chrome VI : réduction chimique du chrome VI en chrome III via une solution réductrice à base d'acide ascorbique (réduction non réversible) totalement neutre pour l'environnement. Le premier prototype a été mis en œuvre sur un lot de la Ligne 14 du métro parisien. Le pilote conçu et construit par MS est aujourd'hui opérationnel sur le chantier de Calais 2015 attribué au groupement Bouygues Travaux Publics (mandataire), Spie Batignolles et Jan de Nul.

Lors de la 6^e édition des Intermat Innovation Awards à Paris en 2015, face à un jury de professionnels européens issus des secteurs de la recherche et de l'industrie, MS a reçu le prix du développement durable pour sa station de traitement des eaux pour l'abattage du chrome VI en chrome III.



10
© MS

MS est intervenu à Londres dans le cadre du creusement du Lee Tunnel pour réduire les débordements fréquents de la Tamise. Mis en œuvre par Vinci Construction Grands Projets et Bachy Soletanche Ltd en joint-venture avec Morgan Sindall, le projet consistait à réaliser un tunnel de 7 km de longueur en grande profondeur (puits d'accès du tunnelier à près de 100 m) visant à réduire d'environ 40% la quantité d'eau polluée rejetée chaque année dans la Tamise.

Grâce à ce tunnel, cette eau usée est maintenant captée à la source et transférée via ce tunnel à la station d'épuration de Beckton, à l'est de la capitale britannique. L'achèvement total du projet est intervenu au printemps 2016. Il est prévu de réaliser des lots complémentaires pour que cet égout géant traverse toute la ville de Londres. Pour l'un d'entre eux, MS vient de se voir confier la fourniture d'une usine complète.

« À l'issue d'un tel chantier, MS rachète généralement les usines, les régénère et donne une seconde vie aux éléments les plus nobles qui peuvent alors être reconfigurés pour une nouvelle utilisation ».

Dans la même démarche de recyclage des déblais, le métro de Lyon est un sujet qui redevient d'actualité.

« Au début des années 2010, précise Alexandre Guillaume, le chantier du prolongement de la Ligne B du métro de Lyon jusqu'à Oullins a constitué un chantier d'exception qui a mobilisé des savoir-faire et techniques exceptionnelles auxquels MS a participé ».

Traverser le Rhône fut la grande particularité du projet. Pour construire une galerie souterraine à plus de 15 m sous

le lit du fleuve, le SYTRAL a choisi d'utiliser un tunnelier à pression de boue qui a commencé sa course de 1,4 km entre Lyon Gerland et Gare d'Oullins en septembre 2010 pour permettre une mise en service du prolongement en décembre 2013.

Un projet complémentaire pour desservir le sud-ouest de l'agglomération lyonnaise entre Gare d'Oullins et Hôpitaux Lyon Sud en est actuellement au stade des consultations, auquel nous nous préparons à prendre part. Les travaux, dont il est prévu qu'ils mettront en valeur les déblais extraits, pourraient être entrepris à partir de 2019.

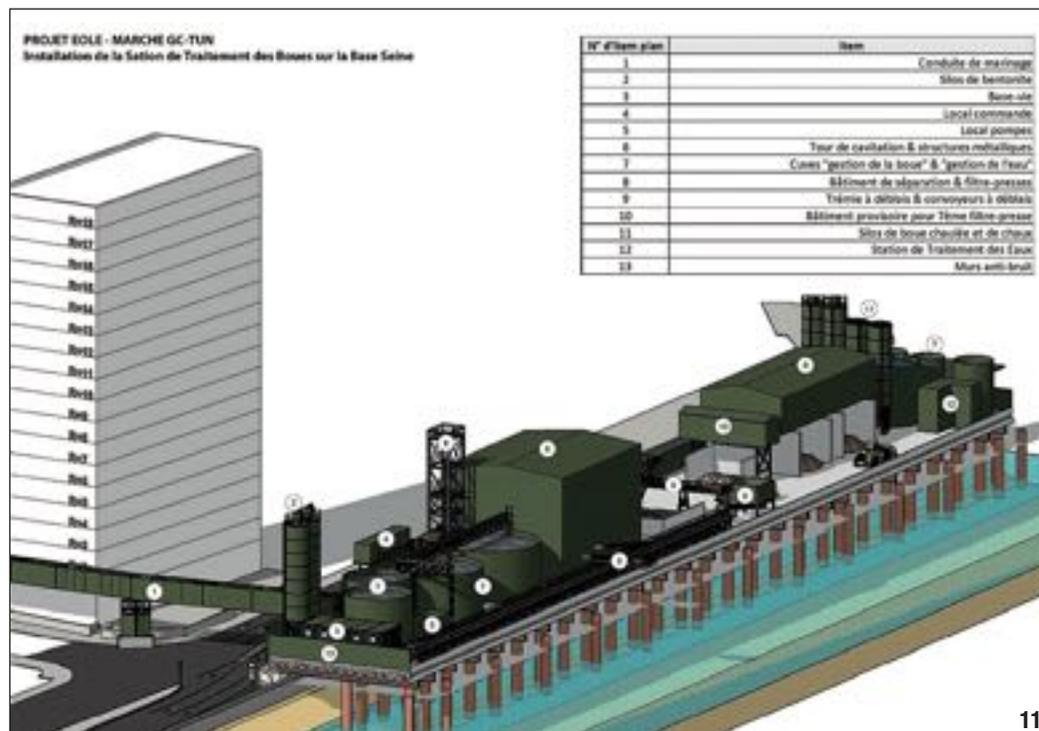
10- L'usine du tramway de Nice est implantée longitudinalement en bordure du vieux port.

11- Pour Éole, une structure de 25 m de large et 180 m de long permettra la construction de la station de traitement des boues MS, afin d'évacuer par barges sur la Seine 650 000 t de déblais.

DES OUVRAGES EXCEPTIONNELS À L'EXPORT

Parmi les chantiers de référence à l'export auxquels MS a participé en accompagnant des entreprises françaises ou en étant associée à des groupes étrangers, le tunnel sous le Bosphore à Istanbul est l'un des plus récents, avec la fourniture d'une usine de traitement qu'il a fallu rendre antisismique.

En octobre 2013, la Turquie avait ouvert le tunnel ferroviaire Marmaray, première voie sous-marine à relier les rives européenne et asiatique de la mégapole de 18 millions d'habitants.



11



© MS 12

Depuis décembre 2016, il est également possible de conduire son véhicule sous le Bosphore, grâce à un projet qui vise à soulager le trafic notoirement embouteillé de la ville turque.

Le tunnel Avrasya (Eurasie) de 13,80 m de diamètre et de 5,4 km de long, dont 3,4 sous le Bosphore, permet de lier les deux rives en 15 minutes, contre 1h30 à 2 heures actuellement en raison du trafic. On y envisage le passage de 120 000 à 130 000 véhicules par jour. Réalisé par un consortium alliant le groupe privé de construction turc Yapi Merkezi et le sud-coréen SK Group, le projet a nécessité un investissement de

12- L'usine de traitement du chantier Cross-rail à Londres.
13- Le prototype de traitement du chrome VI mis en œuvre sur le chantier de la Ligne 14 du métro de Paris.

1,245 milliard de dollars. Constitué de deux niveaux, il a été construit à l'aide d'un tunnelier qui a permis d'avancer de 8 à 10 m par jour en moyenne. Selon ses concepteurs, la terre retirée par l'opération pourrait remplir 788 piscines olympiques, le ciment utilisé remplir 18 stades et la quantité de fer utilisée construire 10 tours Eiffel. Avec des entreprises nord-américaines, MS a participé dans les années 2009-2011 à la construction du nouveau tunnel de métro entre le nord de Manhattan et le Queens, réalisé sous la Queens River à l'aide d'un tunnelier à pression de boue. Une première expé-

rience américaine réalisée avec succès dans un environnement géologique et urbain particulièrement contraignant. À l'exportation, les travaux récents ou en cours à Hong Kong, ont mobilisé l'ensemble des équipes de MS pendant les cinq dernières années.

Le tunnel sous-marin qui relie l'île de l'aéroport de Chek Lap Kok à la ville de Tuen Mun sur les Nouveaux Territoires s'intègre dans le même programme d'infrastructures engagé par la ville que celui du pont. C'est un projet de 2 milliards d'euros réalisé par Dragages Hong Kong dont les travaux ont commencé mi 2013 et s'achèveront fin 2018.

« Ce projet est spectaculaire, précise Alexandre Guillaume, car il s'agit de réaliser, au tunnelier, deux tunnels de 4,5 km de longueur et de 14 m et 17,60 m de diamètre, à grande profondeur, jusqu'à 60 m sous la mer avec, à l'entrée comme à la sortie des ouvrages, au niveau des rampes d'accès, une difficulté particulière du fait d'un élargissement faisant passer la chaussée de deux à trois voies ». Pour ce chantier, MS a fourni une usine de traitement, la plus grande actuellement au monde, d'une superficie de 10 000 m², d'une capacité de traitement de 6 000 m³/h de boues de forage.

L'entreprise a également participé à Hong Kong à des chantiers moins spectaculaires mais nécessitant une logistique de conception très inhabituelle : ▷



© MS 13



14
© MS

comment intégrer une usine de traitement et le puits d'accès d'un tunnelier dans une cour d'immeuble, avec des contraintes anti-typhon et anti-bruit. Tel était le challenge posé par la construction de l'un des lots de la MTR West Island Line 703. Le projet consiste à réaliser deux tunnels de métro de, respectivement, 770 m et 438 m de longueur reliant la ligne de MTR Island à partir de la station existante de Sheung Wan jusqu'à la nouvelle station de Sai Ying Pu⁽¹⁾.

Toujours à Hong Kong, l'entreprise clermontoise intervient sur le lot 1128 faisant partie de l'extension de 6 km du Shatin à Central Line, de Kowloon au hub de transit sur l'île de Hong Kong et, dans le domaine purement ferroviaire, elle a participé à la construction de la ligne à grande vitesse XLR820-821 (Hong Kong Express Rail Link) qui doit relier Pékin à Hong Kong.

RETOUR EN FRANCE

Au niveau des usines de grande dimension, MS est revenue en France pour la ligne Ouest-Est du tramway de Nice. La nouvelle ligne de ce tramway qui est pour partie aérienne et pour partie souterraine a pour objectif d'améliorer l'offre de transport dans le bassin métropolitain de Nice Côte d'Azur.

Longue de 11,3 km et comportant 20 stations, elle suit l'axe Ouest-Est de la ville, avec deux branches à l'ouest :
→ Une branche Nord de 1,7 km, se

dirigeant vers la plaine du Var, allant de Saint-Augustin jusqu'à Nikaïa et au Centre Administratif Départemental (CADAM) ;

→ Une branche Sud de 1,9 km, desservant les deux terminaux de l'aéroport depuis Saint-Augustin.

La ligne se poursuit sur un tronçon commun de 7,7 km, depuis le futur pôle multimodal de Saint-Augustin à l'ouest vers les quartiers Est. Elle continue sa route dans le centre-ville en souterrain (4 stations) jusqu'au port de Nice.

« La gageure était d'installer l'usine au cœur de la ville, indique Alexandre Guillaume, quasiment sur le port, dans un contexte "glamour" pour la photo mais difficile pour un chantier de Travaux Publics : un environnement qu'il

convenait évidemment de préserver, tant visuellement qu'en ce qui concerne les nuisances sonores avec la proximité du port de plaisance et de la vieille ville et des remparts, ainsi que la densité de la circulation piétonne et automobile en bordure et sur la promenade des Anglais ».

L'usine se développe sur une bande longue et étroite qui représente une singularité technique en plus de l'engagement de performances et qui a été un élément déterminant dans le choix de l'entreprise : matériels de séparation des matériaux, trémies de stockage des déblais, conteneurs abritant l'intelligence artificielle de l'usine... Sur ce chantier, l'évacuation de la totalité des déblais est assurée par barges.

Cette expérience a été mise à profit pour répondre aux exigences de l'un des chantiers du projet Éole, prolongement du RER E vers l'ouest dont SNCF Réseau est maître d'ouvrage - pour lequel le client de MS - le groupement Bouygues Travaux Publics / Razel-Bec / Eiffage Génie Civil, Sefi Intrafor et Eiffage Fondations qui a remporté le marché relatif au Génie Civil du Tunnel de Courbevoie à Haussmann-Saint-Lazare et de la Gare de Porte Maillot - a fait le choix d'assurer, également par barges, l'évacuation de la totalité des déblais issus du creusement du tunnel.

Le chantier se situant au centre de Courbevoie, à la périphérie du quartier de La Défense, il est ainsi prévu de



15
© MS

14- L'installation MS sur le site de traitement de matériaux de démolition de l'entreprise Rousseau aux Sables d'Olonne.

15- Les installations de MS à Veyre-Monton dans le Puy-de-Dôme.

réaliser une estacade au-dessus de la Seine pour y établir l'usine de traitement des déblais.

Les quantités sont révélatrices des dimensions de l'opération : 650 000 t de déblais, 2 500 m³/h de boues de forage traitées.

FONDACTIONS SPÉCIALES : TROPHÉE DE L'INNOVATION SOLSCOPE

MS n'est pas encore très présent dans les fondations spéciales mais ce secteur constitue l'un de ses projets de développement.

« Dans l'univers des fondations spéciales, précise à ce sujet Alexandre Guillaume, le développement des parois moulées s'est accompagné de celui de la boue mise en œuvre pour les stabiliser pendant la phase de forage. Est apparu ainsi le besoin de disposer de dessableurs afin de traiter et de recycler ces boues mais avec des contraintes techniques moindres que celles de l'univers des tunnels ».

Aujourd'hui, MS est en mesure d'adapter ses équipements les plus nobles - notamment les filtres-presses pour



16
© MS

16- De gauche à droite, Cécile, Jean-Paul et Alexandre Guillaume.

le traitement des boues usées - aux boues bentonitiques mises en œuvre sur les chantiers de fondations spéciales.

C'est ainsi que l'entreprise a présenté

lors du dernier Solscope à Lyon en juin 2017⁽²⁾ des solutions issues du transfert de technologie du filtre-presse de l'horizontal au vertical et a reçu pour cette présentation le trophée de l'innovation pour son procédé de valorisation des boues de forage et préservation de l'eau.

La solution proposée, à la fois mobile et modulaire, est adaptable aux différentes tailles de chantier qu'il s'agisse de filtre-presse mobile, de filtre-presse "single"

ou de filtre-presse modulaire "twin". Les résultats annoncés pour cette nouvelle génération de filtres-presses sont séduisants :

- 20% d'économie sur les coûts opérationnels pour un filtre-presse par rapport à une centrifugeuse ;
- Jusqu'à 90% d'eau récupérée par pressage des boues avec filtre-presse ;
- 100% des cakes issus des filtres-presses peuvent être revalorisés ;
- 30% de CO₂ en moins.

Avec ces arguments, MS est armée pour retrouver une présence significative sur ce marché.

« Notre ambition pour demain, conclut Alexandre Guillaume, est d'apporter des solutions toujours plus pertinentes, plus simples et plus rapides à mettre en œuvre pour des réalisations de qualité. Parce que l'eau est la première de nos richesses, la préserver est notre devoir. » □

1- MTR : Mass Transit Railway Corporation (gestionnaire du réseau de métro de Hong Kong).

2- Solscope : Salon international de la Géotechnique, du forage et des fondations spéciales.



La combinaison d'une expertise reconnue et de moyens industriels de grande capacité dédiés aux travaux souterrains permet à **NFM Technologies** d'intervenir comme fournisseur majeur de tunneliers. Depuis 30 ans nous sommes présents sur le marché du creusement mécanisé d'ouvrages souterrains tels que les tunnels routiers et autoroutiers, ferroviaires, galeries hydrauliques ou techniques, lignes de métro.

L'expertise de **NFM Technologies** couvre une gamme de tunneliers de grand diamètre, allant de 4 à 16 m, et utilisant une technologie conçue pour travailler dans tout type de géologie : pression de terre (EPB), slurry, pression de boue Benton' air®, bouclier simple ou double pour roche dure, mode mixte.

NFM Technologies
Le Lugdunum
5, Place Jules Ferry 69456 Lyon Cedex 06
Tél. +33 (0)4 26 84 87 00 • contact@nfm-technologies.com
www.nfm-technologies.com

PROLONGEMENT D'ÉOLE : CONSTRUIRE L'AVENIR AU CŒUR DE LA VILLE

AUTEURS : PHILIPPE VAILLANT, DIRECTEUR DE PROJET DU GROUPEMENT, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - VASCO DIEGUES, REPRÉSENTANT QUALITÉ ENVIRONNEMENT DU GROUPEMENT, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS - GAËLLE LARIVIÈRE, REPRÉSENTANT ENVIRONNEMENT DU GROUPEMENT, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - GUILLAUME VASSAL, INGÉNIEUR TRAVAUX EN CHARGE DE LA PLATEFORME « BASE SEINE », RAZEL-BEC - ALEXIS DIEULOT, INGÉNIEUR TRAVAUX EN CHARGE DE LA CONDUITE DE MARINAGE, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

LE MARCHÉ GC-TUN NOTIFIÉ EN SEPTEMBRE 2016 PAR SNCF RÉSEAU CONSTITUE UNE PARTIE HORS DU COMMUN DU PROLONGEMENT VERS L'OUEST DU RER E, AVEC LA CONSTRUCTION DU TUNNEL DE HAUSSMANN SAINT-LAZARE À COURBEVOIE ET DE LA GARE PORTE MAILLOT. SA SITUATION EN MILIEU URBAIN TRÈS DENSE À PROXIMITÉ DE NOMBREUX BÂTIS ET D'INFRASTRUCTURES EN EXPLOITATION, ET LA DIVERSITÉ DES PROFILS GÉOLOGIQUES TRAVERSÉS EN FONT UN PROJET COMPLEXE. LE GROUPEMENT EN CHARGE DES TRAVAUX EST CONSTITUÉ DE BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, EIFFAGE GÉNIE CIVIL, EIFFAGE FONDATIONS, RAZEL-BEC ET SEFI-INTRAFOR.



1
© PROJET ÉOLE SNCF RÉSEAU

Construire l'avenir de la ville au cœur de la ville, c'est tout d'abord réussir l'insertion du projet dans un environnement sensible en surface comme en profondeur (figures 1 et 2).

LIMITER L'IMPACT EN SURFACE

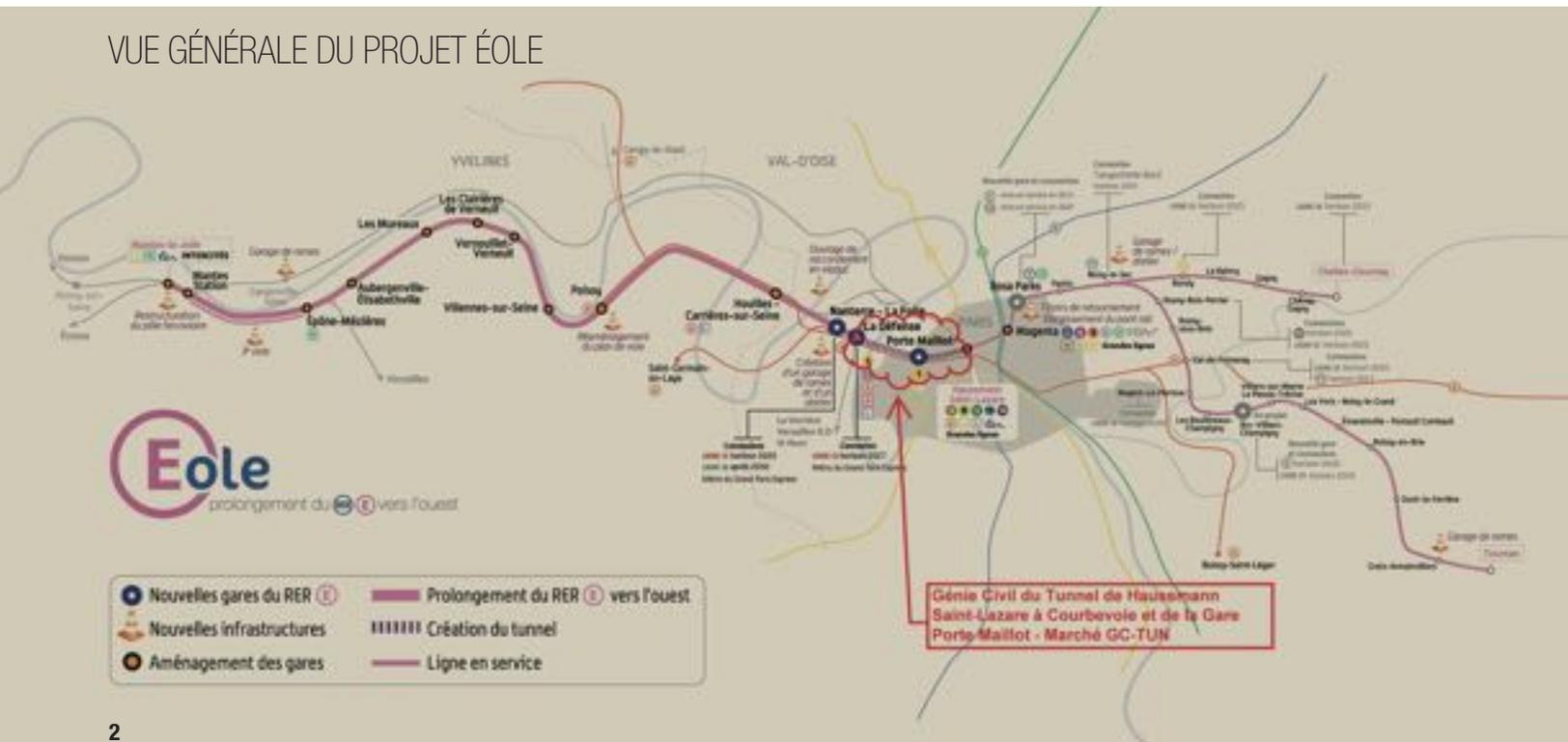
Dès l'appel d'offre, le groupement, répondant à la demande du MOA, SCNF Réseau, a cherché en premier

1- Vue 3D du
marché GC-TUN.

1- 3D view of the
GC-TUN contract.

lieu à limiter l'impact sur l'environnement en surface en élaborant des solutions visant à limiter le trafic urbain et les nuisances sonores générés par son activité.

VUE GÉNÉRALE DU PROJET ÉOLE



2

© PROJET EOLE SNCF RÉSEAU

UN MOINDRE TRAFIC

La réalisation d'un tunnel d'une section excavée de presque 100 m² sur 6,1 km nécessite l'évacuation d'un volume très important de matériaux. La conception initiale du projet conduisait, dans une première phase, à devoir transporter ces déblais depuis la place Charras vers le boulevard Circulaire, où était implantée une installation de traite-

2- Vue générale du projet Éole.

3- Vue de synthèse du marché GC-TUN.

2- General view of the Éole project.

3- Synthetic view of the GC-TUN contract.

ment de boue ou de déblais, jusqu'à une base de chargement en bordure de Seine le long de la RD7. L'étude logistique correspondante montrait que Courbevoie serait traversée par plus de 20 camions semi-remorques par heure. Un mode de creusement et une logistique alternatifs ont alors été proposés, qui ont permis de diviser par 4 ce trafic : l'utilisation d'un tunnelier à

pression de boue. Cette technique où les déblais excavés sont mélangés à une boue bentonitique puis transportés par pompage dans des conduites sous pression est également bien adaptée aux conditions géologiques rencontrées sur le tracé complet du tunnel.

La consultation des parties intéressées en phase commerciale a confirmé l'intérêt de la solution technique choisie et le schéma logistique correspondant a été développé (figure 3) avec deux composantes principales :

- En première phase, une conduite aérienne traversant Courbevoie et permettant d'acheminer directement les déblais du tunnelier jusqu'à la zone de traitement (voir zoom ci-après) ;
- une base sur le bord de la Seine qui reçoit la centrale de traitement des boues du tunnel (voir zoom ci-après).

Le schéma logistique alternatif, au-delà de la réduction du trafic dans Courbevoie, présente aussi bien d'autres avantages :

- Un schéma inchangé pendant toute la durée de la construction du tunnel :
 - des coûts et des délais d'installation réduits (pas de déménagement d'installations entre la phase 1 - creusement du tunnel de Gambetta au puits Abreuvoir - et la phase 2 - creusement à partir du puits Abreuvoir).



© BYTP-EIFFAGE GC-RAZEL-BEC

3

- Un espace de stockage des vau-soirs plus important à Gambetta (pas de station de traitement implantée sur la zone d'installation) :
 - une sécurisation des approvisionnements du tunnelier.
- Un système d'évacuation des déblais par marinage adapté à la nature des matériaux extraits et facilitant leur tri avant expédition fluviale :
 - un impact positif sur les coûts de transport et de stockage.
- Une station de traitement de plus forte capacité sur la base Seine :
 - une évacuation fluide des volumes excavés (jusqu'à 2 000 m³ en place/jour, soit 2 barges de capacité 2 000 à 2 500 t/jour) qui limite les impacts sur la RD7 ;
 - une sécurisation des cadences d'avancement du tunnelier.

UNE MEILLEURE MAÎTRISE DES NUISANCES SONORES

La solution retenue, offrant des installations fixes, permet aussi de mettre en place des dispositifs adaptés de



4 © PROJET EOLE SNCF RÉSEAU

- protection acoustique ou de profiter d'installations déjà closes limitant les nuisances sonores :
 - Capotage de la conduite de marinage, étudié sur la base du retour d'expérience d'un projet similaire (tramway de Nice) ;
 - Plusieurs parties de l'usine de traitement des boues sur la base

4- Murs anti-bruit à proximité des commerces.

5- Choix du mode de confinement.

4- Noise-abatement walls near shops.

5- Choice of confinement method.

Seine installées dans des bâtiments techniques clos pouvant recevoir les isolations phoniques adéquates.

L'ensemble est complété par :

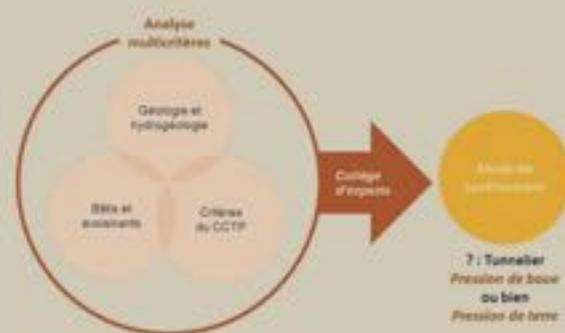
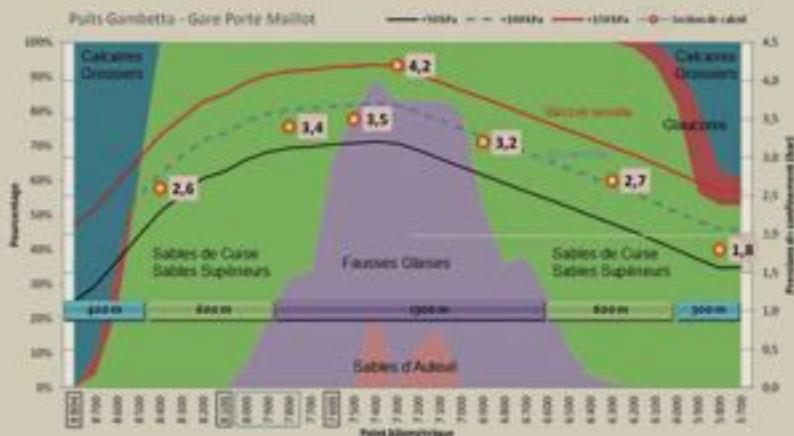
- Des murs anti-bruit jusqu'à 5 m de hauteur pour limiter les nuisances sonores diurnes sur les commerces avoisinant les emprises (figure 4) ;
- Et bientôt par la réalisation d'un hangar clos sur le puits Gambetta qui permettra de travailler 24h/24h en évitant les nuisances sonores pour les riverains.

Dans un contexte urbain dense, l'intégration de tels dispositifs permet de répondre à l'exigence croissante des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre de minimiser les nuisances sonores.

AU FINAL, DES AVANTAGES DÉTERMINANTS POUR LES RIVERAINS DU SECTEUR COURBEVOIE :

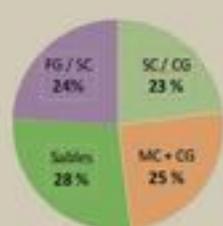
- Des activités de chantier et des mouvements de camions réduits au maximum place Gambetta (pas de traitement de déblais) ;

CHOIX DU MODE DE CONFINEMENT

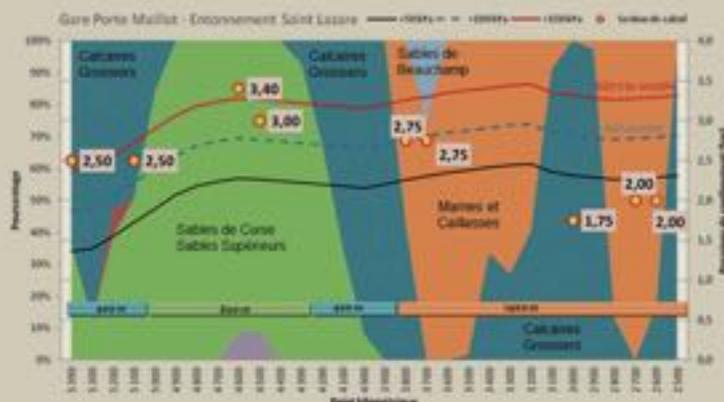


- Contexte géologique
 - Creusement entièrement sous nappe
 - 37 % du linéaire: front homogène
 - 63 % du linéaire: front mixte

■ Identification des horizons géologiques



Fauves Glaises	Prévoir calcaire faible et risque de gonflement. Au front avec Sables de Course
Marnes & Calcaires	Dissolution de gypse quasi absente
Calcaires Grossiers	Projet hors zone calcaire
Sables de Course	Pression hydrostatique > 250 kPa. Passager sous la Seine et sous bld Gambetta - GPM (pas de couverture constante)
Sables Beauchamp	Zone « synthèse » en tal de section



- Une base Seine éloignée des habitations avec un impact limité sur la RD7 ;
- Des nuisances sonores réduites par un haut niveau d'isolation phonique des installations de Gambetta, de la base Seine et des tuyaux de marinage.

LIMITER AUSSI L'IMPACT EN PROFONDEUR

Creuser un tunnel, c'est tout d'abord maîtriser, en s'adaptant aux différentes conditions rencontrées en sous-sol, le risque des tassements qui peuvent survenir pendant la réalisation de l'ouvrage et générer des désordres aux bâtis situés au-dessus du tracé.

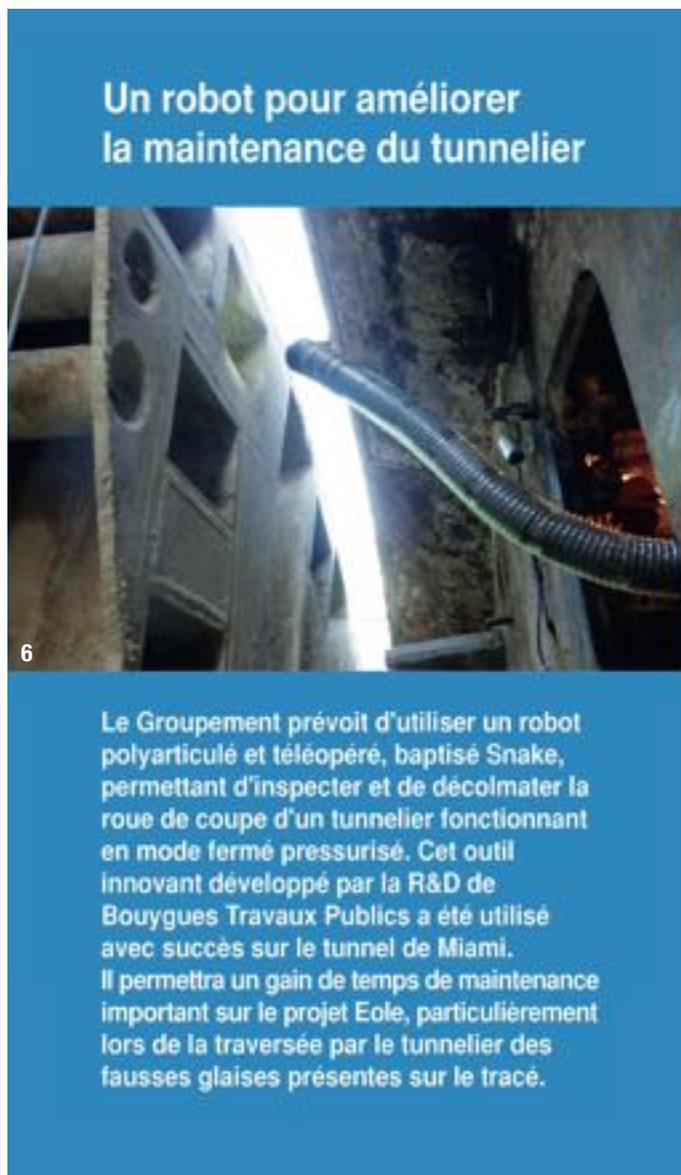
TROUVER LE MODE DE CREUSEMENT AU TUNNELIER LE PLUS APPROPRIÉ

À ce niveau, le projet présente des particularités déterminantes :

- Par sa longueur : les horizons géologiques et les conditions hydrologiques sont très variés.
- Par sa profondeur : le creusement sera effectué jusqu'à plus de quarante mètres de profondeur, ce qui est hors norme en région parisienne et nécessite des pressions de confinement importantes.

Sur la base des données de sol existantes, des enquêtes sur le bâti et des contraintes exprimées dans le CCTP, les directions techniques des entreprises du groupement réunies en collège d'experts ont déterminé le mode de confinement le plus adapté à la situation rencontrée (figure 5).

L'expérience des différents modes de creusement et des terrains de la région parisienne a été déterminante. Les Sables de Cuise sont présents « pleine face » sur près de 25% du tracé et en faciès mixte sur les 75% restants. Le tassement admissible en surface est limité de 15 à 30 mm selon les bâtis. Ceci rend nécessaire une très bonne maîtrise du confinement, c'est-à-dire une gestion très fine de la pression au front de taille, ainsi que de hautes pressions de confinement, jusqu'à 4,2 bars. L'expérience montre que les tunneliers à pression de boue permettent un contrôle de la pression avec une précision de 0,1 bar ; contre 0,6 bar pour les tunneliers à pression de terre qui ne sont pas non plus bien adaptés aux hautes pressions. Un tunnelier à pression de boue a donc été choisi. Une autre difficulté à traiter sur le tracé du tunnel lors du creusement est la présence de Fausses Glaises. Pour



© BYTP-EIFFAGE GC-RAZEL-BEC

6- Robot de maintenance du tunnelier.

6- TBM maintenance robot.

limiter les risques de colmatage complet de la tête de coupe et optimiser aussi les phases de maintenance, le groupement propose aussi l'utilisation d'un robot (figure 6).

CONTRÔLER L'ABSENCE D'IMPACT SUR LES RIVERAINS

Afin de mesurer avec précision l'impact des travaux du tunnel sur les ouvrages avoisinants, le groupement met en place un système d'auscultation permanente des bâtis et des terrains extré-

mement complet, faisant appel à des moyens très variés.

Pour le seul suivi en surface des bâtis situés au-dessus du tunnel, pas moins de 2300 points de mesures sont prévus par le groupement. À cela, il convient d'ajouter l'ensemble du dispositif mis en place sur le tunnelier afin de contrôler, à l'avancement, les tassements du terrain. À la grande quantité de capteurs à surveiller, s'ajoutent les difficultés d'accès à certains lieux qui obligent à recourir à un matériel et à des méthodes adaptés à chaque situation (notamment à des mesures semi-automatiques ou à une transmission à distance des données). Toutes les informations recueillies par les différents dispositifs de mesure sont corréliées avec l'avancement du chantier et la météorologie. Pour analyser en permanence cette masse considérable de données, le groupement a constitué

une équipe spécifique sous la direction d'un responsable des auscultations. Dès qu'une mesure dépasse un seuil prédéfini, une alerte est transmise aux responsables du chantier, via un circuit d'information précis identifiant clairement les personnes décisionnaires. Les actions correctives décidées dans ce cadre peuvent porter sur le déroulement immédiat des travaux (adaptation du pilotage du tunnelier, arrêt provisoire du chantier ...) ou sur une adaptation à plus long terme du chantier (concertation pour adapter les méthodes, propositions de mesures compensatoires ...).

ZOOM - CONDUITE DE MARINAGE : DU CONCEPT À LA RÉALISATION

Le principe d'une conduite de marinage traversant Courbevoie étant défini et validé par l'ensemble des intervenants, internes comme externes, le groupement s'est lancé dans sa concrétisation. La prise en compte de toutes les contraintes des parties intéressées et de toutes les sujétions techniques associées à un tel projet est un défi passionnant, nécessitant du temps pour résoudre tous les problèmes. Les contraintes principales à prendre en compte sont :

- La recherche du tracé minimisant l'impact sur l'environnement : il s'agit, en premier lieu, de limiter l'abattage d'arbres, mais aussi d'éviter la proximité de l'installation avec les commerces ;
 - La recherche du tracé permettant d'éviter des interactions entre fondations et réseaux existants ;
 - La coordination des futurs travaux avec d'autres chantiers éventuellement en programmation sur les mêmes zones ;
 - La prise en compte des interventions en phase d'exploitation, dont l'impact sur la voirie doit être limité.
- Compte-tenu de ces contraintes, la durée d'étude pour aboutir à la validation d'un tracé définitif a été de l'ordre de 8 mois. La collaboration des services techniques de la Ville de Courbevoie et du maître d'œuvre et l'appui sans faille du maître d'ouvrage a constitué le support indispensable à l'opération délicate visant la convergence vers un tracé définitif.

Les fonctionnalités principales de l'ensemble conçu (figures 7, 8 et 9) peuvent être résumées ainsi :

- Assurer l'acheminement de la boue vers le tunnelier ;
- Assurer l'évacuation des déblais vers la station de traitement des boues ; ▷

→ Supprimer toutes les causes et conséquences d'éventuels phénomènes hydrauliques indésirables (coups de bélier, cavitation, effet de fond). Ceci a nécessité une étude de structure, basée sur une étude hydraulique préalable, et a conduit à la définition de sous-systèmes fondamentaux tels que : colliers de raccordement spécifiques, soupapes tri-fonctions, colonnes d'équilibre...

Les choix techniques suivants ont été notables et déterminants pour la maintenance et les interventions en réparation :

- Cheminement de maintenance sur la passerelle ;
- Capotages phoniques démontables ;
- Doublement des ventouses (pour éviter dépression de la conduite lors de sa vidange).

7- Conduite de marinage (coupe 1).

8- Conduite de marinage (coupe 2).

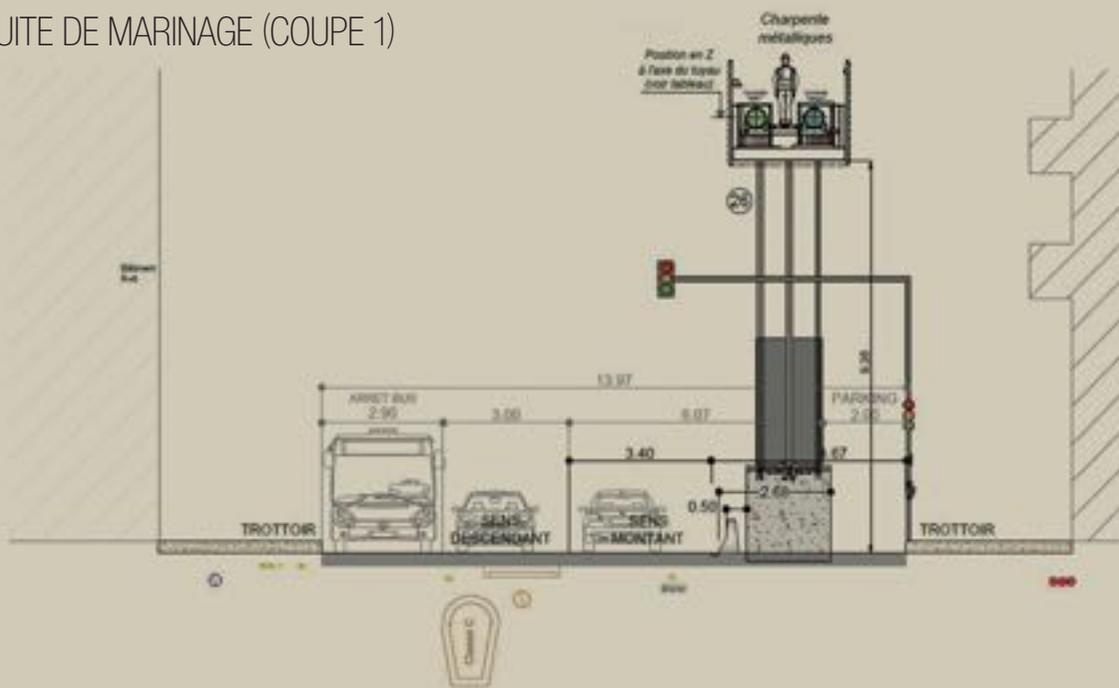
7- Mucking pipe (cross section 1).

8- Mucking pipe (cross section 2).

On retient les quantités principales suivantes :

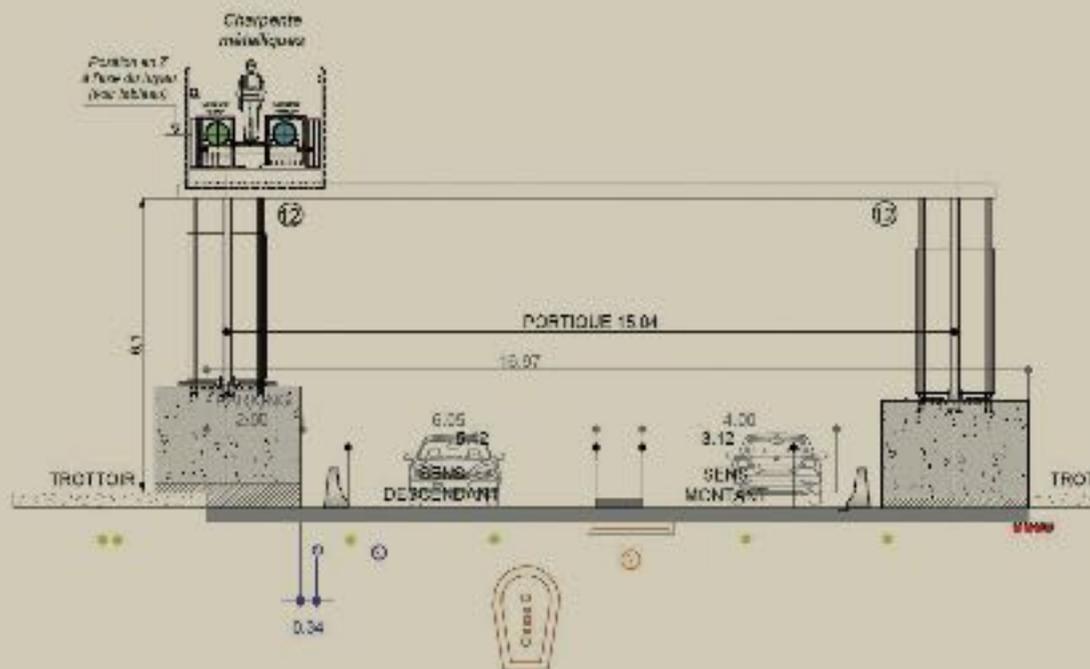
- Linéaire de conduite de marinage et de retour des boues : 1 900 m aller-retour dont 1 700 m sur la passerelle.
- Quantités Principales :
 - Charpente métallique : 450 t,
 - Caillebotis : 800 m²,
 - Béton de fondations : 800 m³,
 - Capotage phonique : 7 000 m²,
 - Bardage latéral : 4 400 m².

CONDUITE DE MARINAGE (COUPE 1)



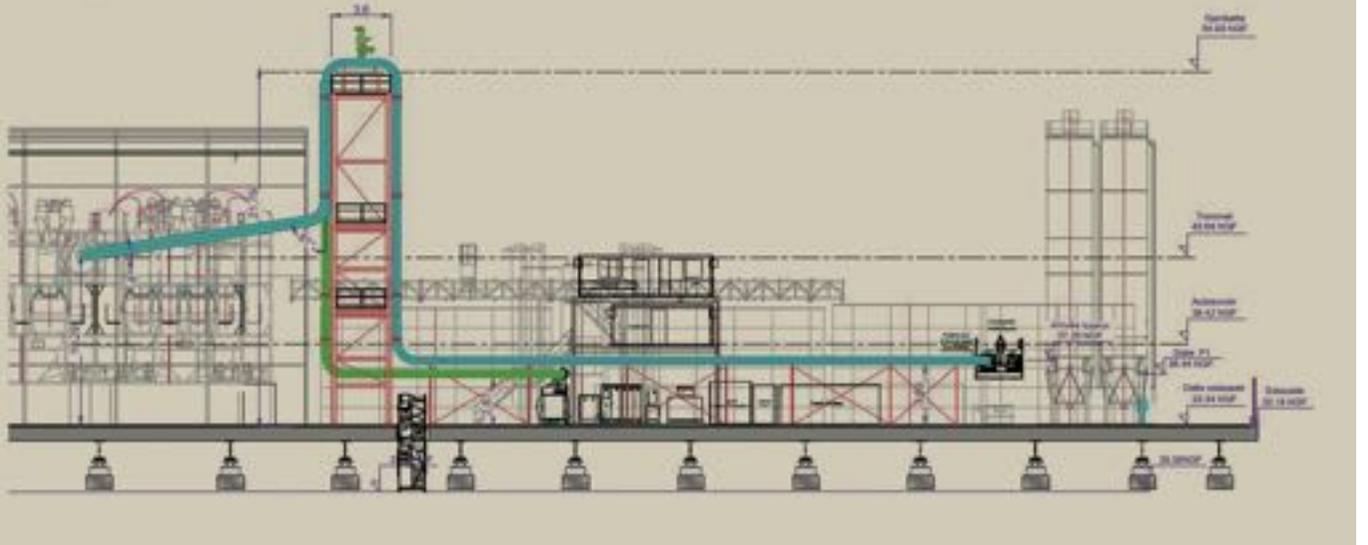
7

CONDUITE DE MARINAGE (COUPE 2)



8

CONDUITE DE MARINAGE (VUE 3)



© BYTP-EIFFAGE GC-RAZEL-BEC

9

ZOOM - BASE SEINE : S'APPROPRIER LE DOSSIER LOI SUR L'EAU EXISTANT, PORTER À CONNAISSANCE LES MODIFICATIONS

Le schéma logistique initialement projeté prévoyait, lui aussi, une installation sur la rive de la Seine.

Le dossier Loi sur l'Eau du projet intégrait donc cette installation. Les modifications induites par la solution tech-

9- Conduite de marinage (vue 3).

10- Station de traitement des boues sur la base Seine (vue 3D).

9- Mucking pipe (view 3).

10- Sludge treatment station on the Seine base (3D view).

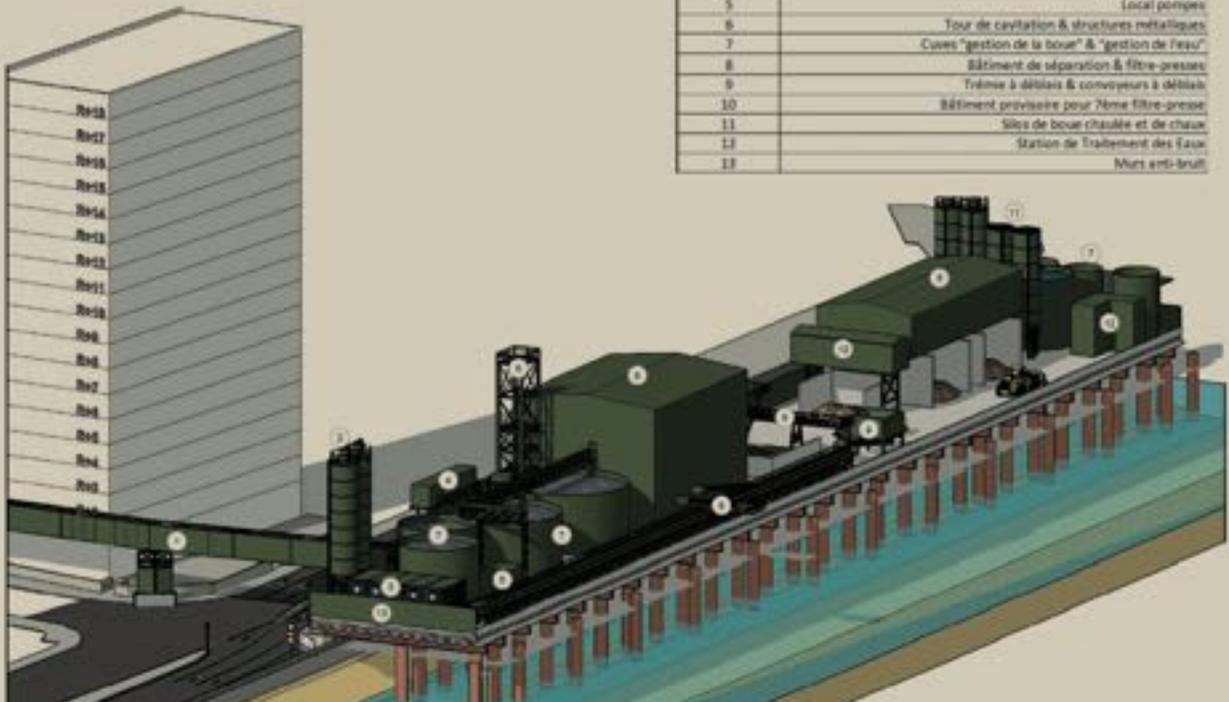
nique et logistique finalement retenue par tous les intervenants (figures 10 et 11), solution qui permettait de réduire l'impact sur l'environnement dans Courbevoie comme explicité ci-avant, ont rendu nécessaire la préparation d'un « Porter à connaissance » traitant de ces modifications et de l'impact sur le dossier existant.

Le délai de préparation et d'instruction d'un tel dossier atteint pratiquement

12 mois et le groupement a organisé la mobilisation des compétences en amont de l'ordre de service pour tenir les échéances. Pour tenir les délais, un travail conjoint avec le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage, ainsi qu'un contact régulier avec les autorités instructrices des dossiers, ont été engagés.

Les principaux points à traiter dans ce cadre sont :

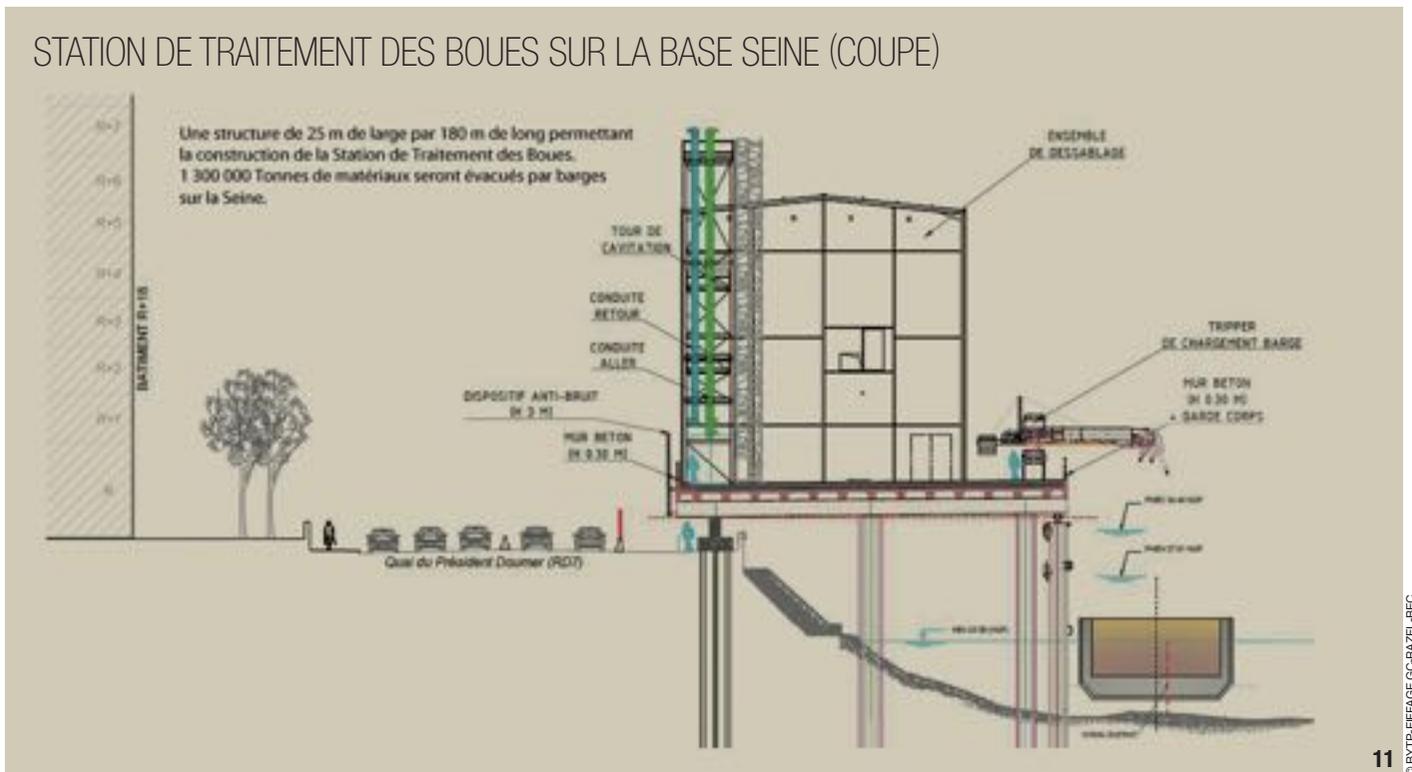
STATION DE TRAITEMENT DES BOUES SUR LA BASE SEINE (VUE 3D)



© BYTP-EIFFAGE GC-RAZEL-BEC

10

STATION DE TRAITEMENT DES BOUES SUR LA BASE SEINE (COUPE)



11

© BYTP-EIFFAGE GC-RAZEL-BEC

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : SNCF Réseau - Projet Éole

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Groupement SED composé de Setec, Egis et Agence Duthilleul

CONSTRUCTEUR TITULAIRE DU MARCHÉ GC-TUN : Groupement d'entreprises composé de Bouygues Travaux Publics, Eiffage Génie Civil, Eiffage Fondations, Razel-Bec et Sefi-Intrafor

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS DU TITULAIRE EN LIEN AVEC LES TRAVAUX DE CET ARTICLE :

- Concepteur & Constructeur du tunnelier : Herrenknecht
- Travaux de Génie Civil de la Base Seine : Groupement constitué d'Eiffage Travaux Maritimes et Fluviaux et de Bouygues Travaux Publics Région France
- Station de traitement des boues du tunnelier sur la Base Seine : Ms
- Charpente des conduites de marinage : Waltefaugle Bâtiment
- Conduites de marinage : Trouvay & Cauvin

11- Station de traitement des boues sur la base Seine (coupe).

11- Sludge treatment station on the Seine base (cross section).

→ Impact sur l'environnement : la solution adoptée limite l'impact sur le milieu aquatique en éliminant les dragages et en supprimant les remblais en Seine ;

→ Impact sur l'extension de crue : calcul des volumes à compenser et mise en place des mesures adéquates. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

TUNNEL : 6,1 km, diamètre 9,90 m (int.) / 10,70 m (ext.), 600 000 m³ de déblais en place, 1 300 000 t de matériaux en sortie de station de traitement, 3 100 anneaux, 24 700 voussoirs

PAROIS MOULÉES : 30 000 m²

VOLUME TOTAL DE BÉTON : 190 000 m³

ABSTRACT

EOLE EXTENSION: BUILDING THE FUTURE IN THE HEART OF THE CITY

PHILIPPE VAILLANT, BOUYGUES TP - VASCO DIEGUES, BOUYGUES TP - GAËLLE LARIMIERE, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - GUILLAUME VASSAL, RAZEL-BEC - ALEXIS DIEULOT, BOUYGUES TP

The start of the project shows to what extent the determination to reduce impacts on the environment in the broadest sense, by entering into dialogue with all the stakeholders as early as possible, can help find innovative solutions to ultimately integrate a major infrastructure project into the city. This is an exciting challenge which requires a lot of time for discussion, sometimes long administrative formalities that must not be neglected, and in which the anticipation of certain aspects before the start of work on a contract, or even before awarding the contracts, can secure the project schedule and leave time for the development of some innovations. □

PROLONGACIÓN DE EOLE: CONSTRUIR EL FUTURO EN EL CORAZÓN DE LA CIUDAD

PHILIPPE VAILLANT, BOUYGUES TP - VASCO DIEGUES, BOUYGUES TP - GAËLLE LARIMIERE, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - GUILLAUME VASSAL, RAZEL-BEC - ALEXIS DIEULOT, BOUYGUES TP

El inicio del proyecto demuestra hasta qué punto la voluntad de reducir el impacto sobre el medio ambiente en sentido amplio, iniciando lo antes posible un diálogo con el conjunto de partes implicadas, puede llevar a encontrar soluciones innovadoras que permitan, in fine, inscribir un gran proyecto de infraestructura en la ciudad. Un desafío apasionante que exige un amplio período de diálogo, procedimientos administrativos en ocasiones largos pero que no deben descuidarse, y en el que la anticipación de algunos aspectos antes del inicio de las prestaciones de los contratos, incluso antes de la concesión de los mismos, permite proteger la planificación del proyecto, dejando tiempo para desarrollar algunas innovaciones. □



PARIS
23 - 28 AVRIL 2018

**SALON INTERNATIONAL
DE LA CONSTRUCTION
ET DES INFRASTRUCTURES**

**DEMAIN
SE CONSTRUIT
AUJOURD'HUI**

VOTRE BADGE GRATUIT

SUR PARIS.INTERMATCONSTRUCTION.COM | **CODE : TRAVAUX18**

 #intermatparis

CONJOINTEMENT AU SALON



COMEXPOSIUM

INTERMAT PARIS
70 avenue du Général de Gaulle
92058 Paris La Défense Cedex - France
E-mail : communication@intermatconstruction.com



1
© VUEDICI.ORG

DÉRIVATION DU GRAND TUNNEL DU CHAMBON. 5 MOIS POUR DÉLIVRER UNE VALLÉE

AUTEUR : GUILLAUME CHOLLOT, DIRECTEUR DU CHANTIER, EIFFAGE GÉNIE-CIVIL

FIN JUILLET 2015, PRÈS DE 400 000 m³ SE SONT EFFONDRES DANS LE LAC DU CHAMBON ET ONT ARRACHÉ LA VOÛTE DU GRAND TUNNEL DU CHAMBON, COUPANT DÉFINITIVEMENT CET ITINÉRAIRE TRÈS EMPRUNTÉ (RD 1091) ENTRE LES DÉPARTEMENTS DE L'ISÈRE ET DES HAUTES-ALPES. APRÈS UN INTENSE CONTRE LA MONTRE, LE CREUSEMENT D'UN TUNNEL DE DÉRIVATION A ÉTÉ ATTRIBUÉ EN MARS 2016 POUR RÉALISER EN UN TEMPS TRÈS RESTREINT (2 MOIS DE PRÉPARATION ET 5 MOIS DE TRAVAUX) 500 m DE TUNNEL EXCAVÉ À L'EXPLOSIF COMPRENANT UN ENTONNEMENT EXCEPTIONNEL, UNE ISSUE DE SECOURS DE 170 m DE LONG ET 3 OUVRAGES ANNEXES.

ENJEUX

Les villes de Grenoble et Briançon sont directement reliées par la RD 1091. Il s'agit d'un axe stratégique pour ces deux territoires puisqu'il constitue une voie de transit entre les départements des Hautes-Alpes et de l'Isère, mais aussi un axe économique majeur entre la France et l'Italie permettant notamment l'accès aux prestigieuses stations de ski de l'Oisans (figure 2).

La construction du tunnel du Chambon a été rendue nécessaire par la réalisation du barrage du Chambon, sur la commune de Mizoen de 1929 à 1935.

Ce tunnel a été construit en 2 tronçons, le petit tunnel et le grand tunnel du Chambon, dont la longueur est de 756 m. Il a été réalisé en deux attaques et en sections divisées dans les schistes de l'Aalénien.

1- Le Robofore dispose de 2 heures pour forer 720 m de trous de chargement.

1- The Robofore has 2 hours to drill 720 metres of charge holes.

UN TUNNEL EN MOUVEMENT PERMANENT

Situé à flanc de montagne, le grand tunnel du Chambon a toujours préoccupé les autorités (figure 3). Peu après sa construction, des mouvements sont apparus dans les premiers décimètres du tunnel, créant des effondrements localisés au niveau du PM 75. Quelques travaux de confortement en béton coffré sont réalisés à la fin des

années 70 et le tunnel est mis sous surveillance. Après quelques décennies de répit, de nouveaux équipements de surveillance sont mis en place par le Conseil départemental de l'Isère, récent propriétaire de l'ouvrage. Les alarmes sonnent. Les fissuromètres détectent en 2014 une nette augmentation de la fissuration du tunnel,



2 © BAYARD PRESSE

obligeant le département à lancer un marché en urgence pour la reconstruction de la voûte. Le tunnel est mis sous haute surveillance. En avril 2015, le tunnel est fermé à la circulation et les travaux de réparation sont entrepris malgré une inquiétante accélération des indicateurs de surveillance.

UN TUNNEL STRATÉGIQUE SOUS LA MENACE

Lac du Chambon : dans l'attente du glissement de terrain



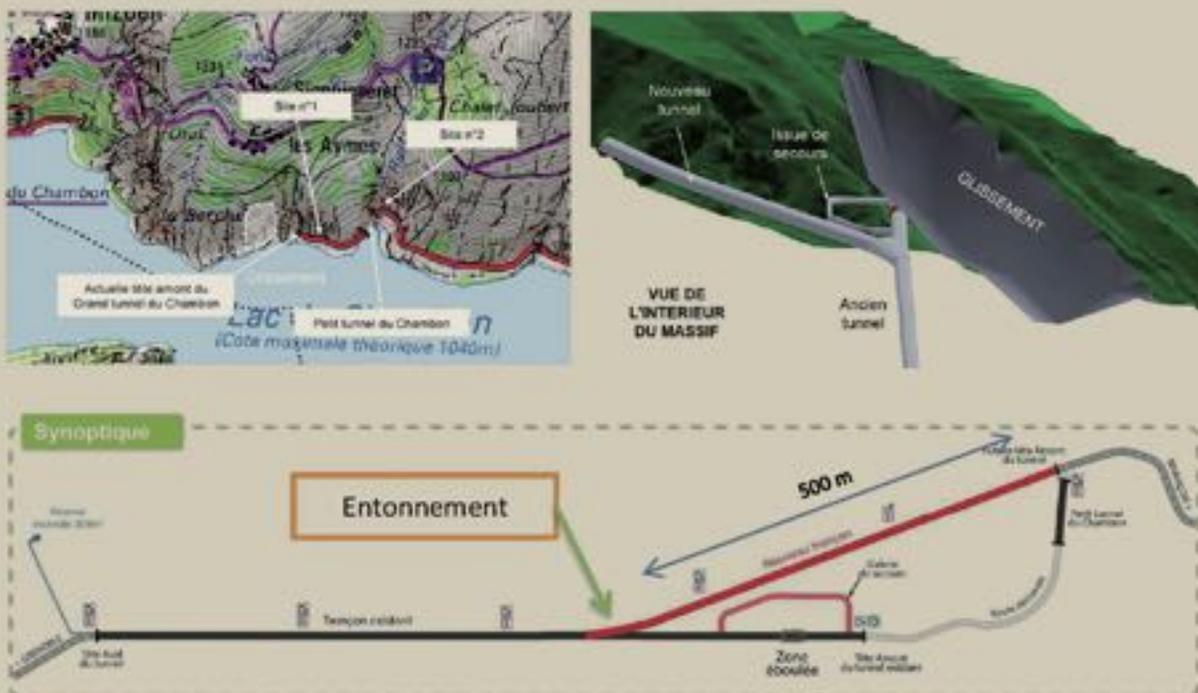
© INFOGRAPHIE DE

3

- 2- Localisation du tunnel du Chambon.
- 3- Un tunnel stratégique sous la menace.
- 4- Dérivation du tunnel du Chambon, objet des travaux confiés à Eiffage.

- 2- Location of Chambon Tunnel.
- 3- A strategic tunnel under threat.
- 4- Chambon Tunnel diversion, works entrusted to Eiffage.

DÉRIVATION DU TUNNEL DU CHAMBON, OBJET DES TRAVAUX CONFISÉS À EIFFAGE



© BUREAUX BG-QUADRIC-ARTELIA

4

Toute une micro-économie est alors stoppée, laissant des milliers d'habitants coupés de leur travail, école ou famille. Les stations de ski prisées sont très inquiètes tandis que les principaux événements sportifs estivaux, le cyclisme en tête, sont tout simplement annulés.

Après quelques jours, les travaux sont précipitamment interrompus car jugés trop dangereux. Toute l'énergie du département est alors concentrée sur deux objectifs :

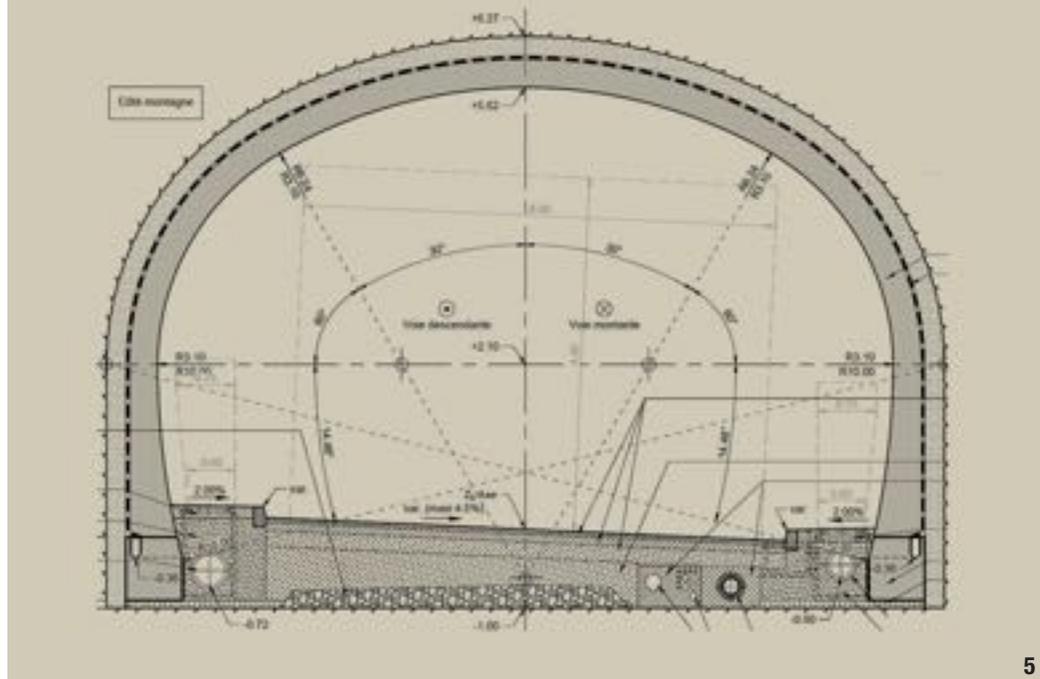
- Ouvrir une route de secours pour soulager les riverains et les acteurs économiques, dont la grogne monte ;
- Réaliser l'étude, l'appel d'offre et les travaux d'un tunnel de dérivation pour rendre à la circulation la route départementale, 18 mois plus tard, début décembre 2016.

UN MARCHÉ ATTRIBUÉ À EIFFAGE GÉNIE CIVIL

Le groupement de maîtrise d'œuvre Quadric - Bg - Artélia réussit, avec le Conseil départemental de l'Isère, à mener en quelques mois les études de faisabilité, les choix de conception, les démarches administratives au sens large, la réalisation des travaux préparatoires et la mise en consultation des entreprises pour tenir un calendrier à rebours très serré en vue d'une attribution début mars 2016.

Le projet devait satisfaire les prescriptions de la circulaire interministérielle N°2000-63. Il a consisté à réaliser un tunnel de dérivation de 500 m de long, évitant la zone d'éboulement, ainsi que toute la mise en sécurité désormais associée à ce type de tunnel (issue de

SECTION DU TUNNEL À EXCAVER - 65 m² SUR 500 m



5

© BUREAUX BG

secours, réseau incendie muni de son réservoir, niches de sécurité, cloisons coupe-feu, multitubulaire et chaussée) (figure 4).

UNE PRÉPARATION ANTICIPÉE ET AMPLIFIÉE

L'entreprise Eiffage Génie Civil a très rapidement ciblé cette affaire. Il a donc été décidé par la direction régionale d'accentuer le travail dans la qualité de l'étude de prix, en anticipant fortement tous les aspects de la très courte période de préparation. L'encadrement définitif a participé de près à l'appel

5- Section du tunnel à excaver - 65 m² sur 500 m.

6- Coupe sur un clou mix-bolt.

5- Cross section of tunnel to be excavated: 65 m² over 500 m.

6- Cross section on a mix-bolt nail.

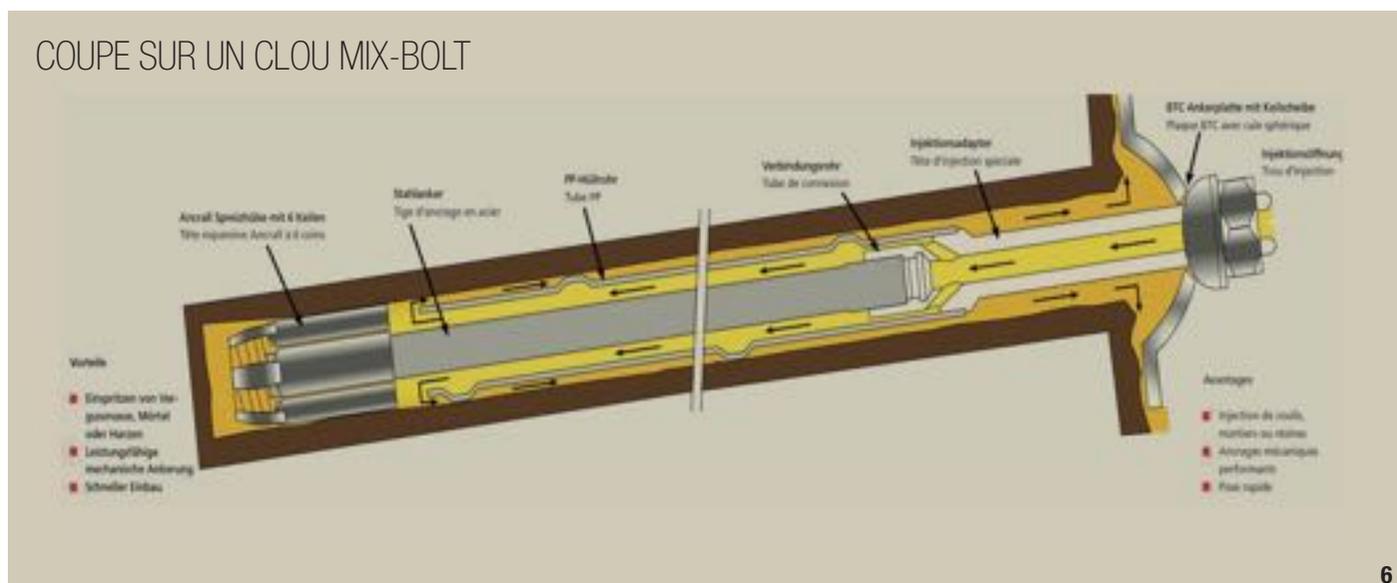
d'offre afin de définir, à ce stade, les méthodes, plans d'installation, plans de tir, choix des sous-traitants.

Le bureau d'études Ingerop a été choisi durant l'étude de prix et a été mandaté pour la réalisation des premières notes de calcul.

Les démarches administratives et préfectorales ont, elles-aussi, été lancées afin de se prémunir contre la longueur possible des délais d'obtention des autorisations nécessaires pour ce type de projet.

Il fallait s'installer vite pour effectuer le premier tir conformément au planning

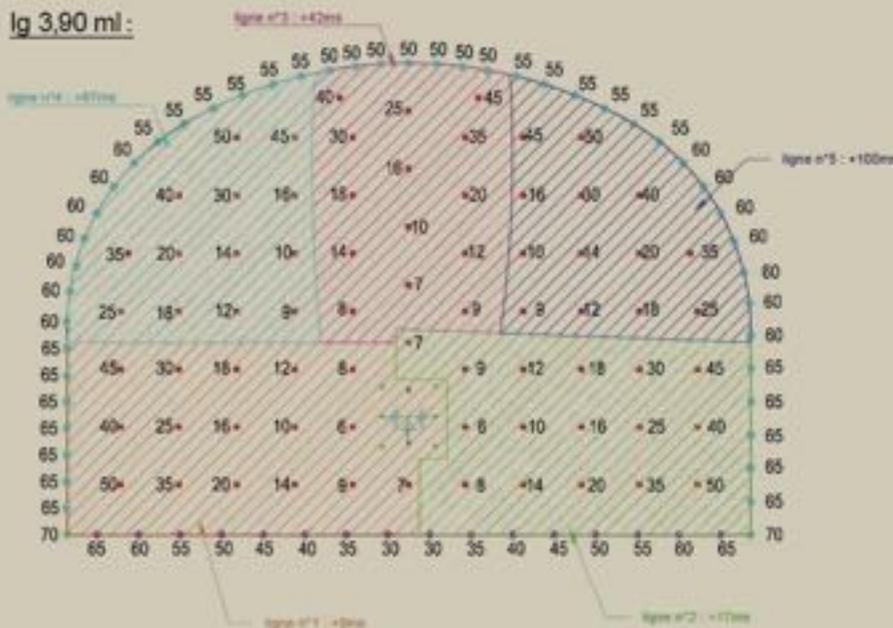
COUPE SUR UN CLOU MIX-BOLT



6

© MINOVA-ORICA

PLAN DE TIR



© DR 7

prévisionnel : 3 mois après l'obtention de l'affaire.
Eiffage Génie Civil en groupement avec le terrassier Carron a été déclaré attributaire le 29 février.

LES TRAVAUX DE CREUSEMENT EN 2016

DE DÉFI EN DÉFI, D'OBJECTIF EN OBJECTIF

Dès le premier jour, près de 12 cadres ont été mobilisés pour réaliser tous les documents nécessaires à la préparation du chantier (notes de calcul, plans, note d'organisation, choix et explication des

7- Plan de tir.
8- Chargement d'une volée.
9- Chargement d'une volée.

7- Blasting pattern.
8- Charging a round.
9- Charging a round.

méthodes, procédures, commandes particulières). Propres à ce type de travaux, de nombreuses démarches administratives ont été conduites avec énergie et les autorisations administratives ont été obtenues en un temps record (arrêté pour stockage d'explosif, travail le dimanche, autorisation de circulation, attestation préfectorale des personnels mineurs, complément en formations, autorisation de prélèvement d'eau, convention d'occupation de terrains). Le 4 avril 2016, conformément au planning, soit 5 semaines après la notification du marché, les travaux

d'installation de chantier ont pu débuter. Ces travaux d'installation ont été posés afin de tenir l'objectif de tirer la première volée dès la fin du mois de mai. Avec la mobilisation de 20 personnes, les ouvriers ont installé la base-vie, les branchements d'eau/air/exhaure dans le tunnel existant, installé le stockage d'explosif et la surveillance dédiée, la ventilation, la signalisation, les stations de traitement des eaux, les éclairages complémentaires, les éléments existants à démonter.

À la fin du mois de mai, le premier tir a pu avoir lieu.

Le 6 juin, le premier tir de la section courante, depuis l'entonnement, a eu lieu, marquant le coup de feu du sprint final.

Le chantier de creusement devait respecter l'objectif initial, celui de percer avant la fin du mois d'octobre.

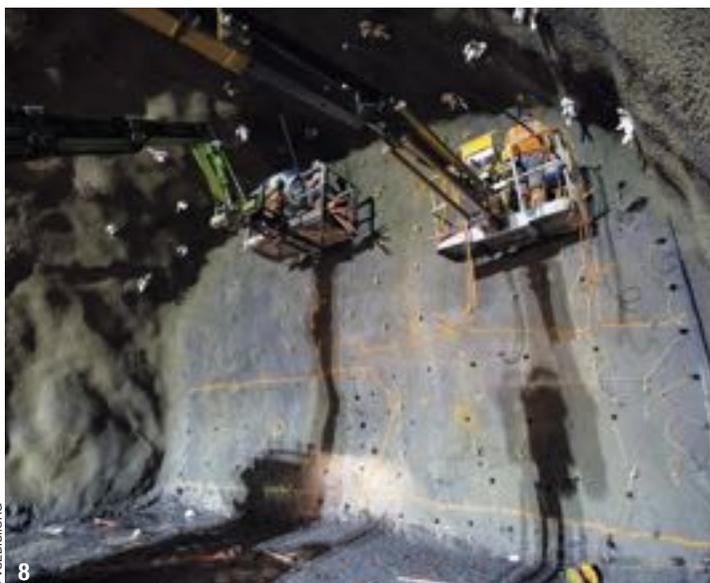
PRÉSENT À CHAQUE SECONDE, DU 6 JUIN AU 10 DÉCEMBRE 2016

Le tunnel à excaver a une longueur de 500 m pour une section de 65 m² (figure 5).

La méthode traditionnelle d'excavation à l'explosif a été retenue, notamment pour des raisons de qualité de terrain, de longueur et des délais très courts. Le cycle classique de creusement a donc été lancé courant du mois de juin dont la composition est la répétition de la boucle suivante :

- Foration,
- Clouage,
- Chargement,
- Tir,
- Marinage,
- Purge,
- Béton projeté.

▷



© VLIEDICI.ORG



10

© VUEDICI.ORG

La foration est réalisée par un robot de foration appelé Robofore, équipé de 3 bras, eux-mêmes équipés de marteaux très puissants permettant de forer 180 trous de 4 m de long en 2 heures (figure 1). L'opération est automatisée par un ordinateur paramétré et contrôlé en cabine par un opérateur. De l'eau est envoyée sous pression à travers les taillants pour gérer les poussières et permettre l'évacuation des cuttings. Une fois l'opération terminée, l'opéra-

teur réalise la foration des clous radiaux, ceux qui permettent au terrain, constitué de plaques et blocs, d'être soutenu. On parle de soutènement léger lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre des clous et de soutènement lourd lorsqu'il s'agit de poser des cintres.

La particularité de cet ouvrage souterrain est qu'il n'est pas prévu qu'il soit revêtu entièrement une fois son excavation terminée. En effet, seules les zones de tunnel considérées en

10- Phase de bétonnage.

11- Entonnement réalisé en 1 mois.

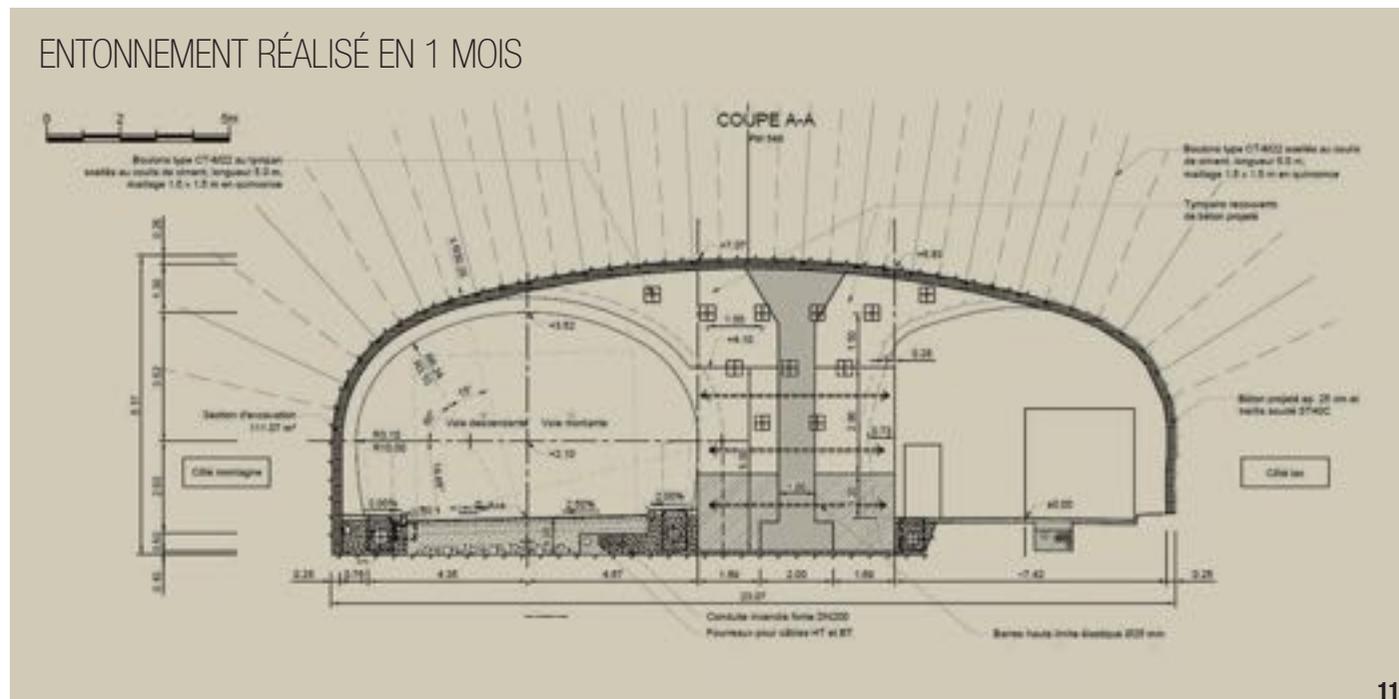
10- Concreting phase.

11- Fork constructed in 1 month.

zones de mauvais terrain, ou en présence d'eau trop abondante, doivent être revêtues. Cette démarche, entreprise dès la conception par le maître d'œuvre, est assez rare pour un ouvrage souterrain neuf.

Le clouage est donc réalisé par des clous de type « mix-bolt » (figure 6) : Ce clou a la particularité d'être « double effet ». Une fois introduit par le mineur dans le trou foré, un simple serrage du boulon extérieur permet au terrain

ENTONNEMENT RÉALISÉ EN 1 MOIS



11

© BUREAUX EG-QUADRIC-ARTELIA



© VUEDICI.ORG

12

d'être soutenu provisoirement, l'ancrage, nommé coquille, en fond de trou, étant alors ouvert. Une fois tous disposés, à raison de 2 à 10 unités par mètre de tunnel, on procède à l'injection. Le coulis est injecté par l'orifice du boulon puis chemine, sous pression, jusqu'à la coquille afin d'envelopper la barre en revenant s'évacuer en trop plein par la plaque (fléchage sur la figure 6). Cette méthodologie, peu employée, permet de clouer provisoirement la volée afin

12- Marinage dans l'entonnement.

13- Cloche géologique.

14- Creusement de l'issue de secours.

12- Mucking in the fork.

13- Subsidence.

14- Excavation of the emergency exit.

de poursuivre le creusement aussitôt, tout en assurant la durabilité du soutènement dans le temps, obtenue par la présence du coulis.

Le chargement est ensuite effectué selon un plan de tir conçu par l'ingénieur de l'entreprise (figure 7). Le choix de l'émulsion encartouchée a été retenu par l'entreprise car cette technique est bien maîtrisée par les mineurs.

Le découpage par ligne de tir et le calibrage des retards entre détona-

teurs permet d'excaver des volées chargées à $1,40 \text{ kg/m}^3$ en moyenne, pour une charge totale de 400 kg, tout en assurant un découpage satisfaisant et une gestion de la vibration conforme aux exigences du marché (figures 8 et 9).

Le tir, d'une durée de quelques secondes, provoque un nuage de poussières toxiques et produit 400 m^3 de déblais à retirer, nommés marin.

Le marinage est effectué par des engins traditionnels tels que les pelles mécaniques, chargeuses de capacité 4 m^3 et dumpers.

S'en suit une phase de purge, permettant de nettoyer la surface fraîchement arrachée, appelée « décousu », de toutes les plaques susceptibles de se décrocher aisément.

Afin de terminer le soutènement, le robot de bétonnage applique une à deux épaisseurs de béton projeté à la cadence de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ (figure 10).

L'épaisseur du béton projeté et le nombre de clous à mettre en œuvre sont définis par le chargé de soutènement de l'entreprise, dont le choix est validé par le maître d'œuvre.

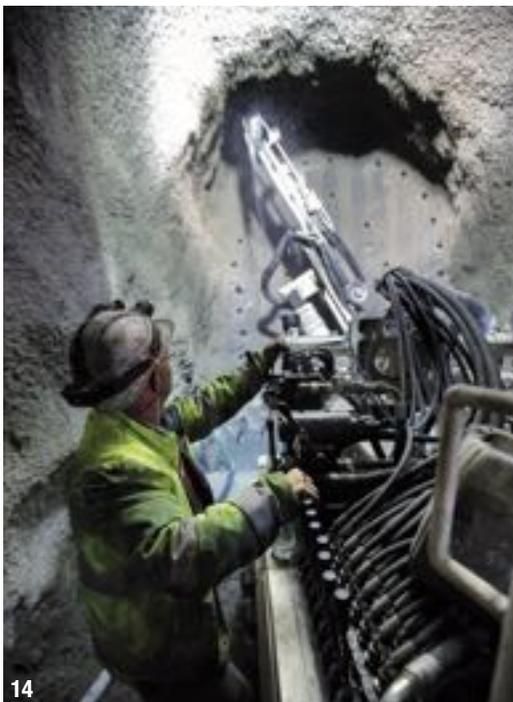
Le cycle reprend alors à son étape 1, la foration.

Le chantier s'est donc organisé dès le lundi 6 juin, pour travailler 7 jours sur 7 et 24 h sur 24, mobilisant 60 ouvriers mineurs, électriciens, mécaniciens, aides, supports, et des dizaines de partenaires dédiés afin de répéter ce cycle, jusqu'au percement.



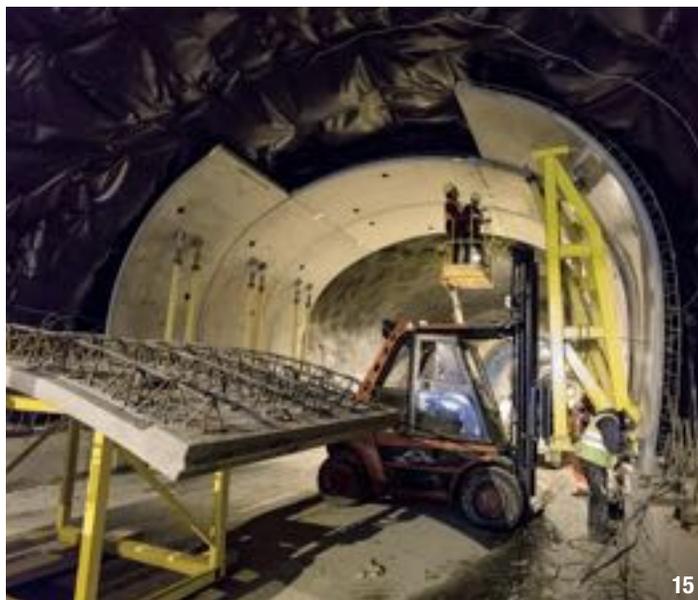
13

© DR



14

© VUEDICI.ORG



15



16



17

15- Montage des coques préfabriquées.

16- Coques préfabriquées en cours de bétonnage.

17- Casquette à l'amont du grand tunnel du Chambon.

15- Assembly of prefabricated shells.

16- Prefabricated shells undergoing concreting.

17- Canopy upstream of Grand Tunnel du Chambon.

UN DÉMARRAGE ARDU

La bifurcation créée entre la portion conservée du tunnel et la nouvelle portion du tunnel, nommée entonnement, s'est effectuée par un alésage progressif du tunnel existant.

Au plus large, la portée entre piédroits est de 23 m, pour une hauteur de 8 m (figures 11 et 12). Cette zone d'entonnement a laissé des traces dans le souvenir des mineurs, qui ont eu la tâche fastidieuse de réaliser un soutènement lourd dans une section exceptionnelle (50 clous par mètre, une nappe de treillis ST40C et 20 cm de béton projeté).

Cette étape, au début de la montée en cadence, a été une démonstration de force et de ténacité des équipes face à un travail ponctuel, technique et de grande difficulté.

UN ALÉA GÉOLOGIQUE

Au milieu du creusement, les mineurs ont dû faire face à une zone géologique chahutée, stoppant net l'avancement du creusement. Une cloche, de plusieurs mètres de haut, s'est effondrée sous l'effet de la purge, laissant apparaître une cheminée importante (figure 13). Les équipes ont réalisé le confortement lourd de cette zone ponctuelle.

LA DÉLIVRANCE DE TOUS LES ACTEURS

Fidèle au planning, le percement a eu lieu le 24 octobre 2017 et laissa place à une cérémonie commune MOA-MOE-entreprises, sonnante la fin de 18 mois de travail intense de chacun des acteurs.

L'organisation mise en place par l'entreprise, accompagnée par les équipes de maîtrise-d'œuvre, a porté ses fruits. Les objectifs techniques et de délais ont été atteints, sans aucun accident du travail.

Globalement, le chantier a bénéficié d'une géologie nécessitant moins de

soutènement lourd qu'initialement prévu. Cela a permis de compenser les difficultés liées à la génération de boue, aux hors profil ainsi qu'aux événements géologiques ponctuels. Le tunnel a ainsi été creusé à la cadence de 2 tirs par jour et cela 6 jours sur 7. Le septième jour permettait d'aménager les servitudes et de couler les radiers provisoires.

VERS DE NOUVEAUX OBJECTIFS

Le tunnel aussitôt percé, les équipes se sont emparées de deux ultimes tâches, celles de percer l'issue de secours et de réaliser les banquettes des zones revêtues avant fin 2016. Le nouvel



18- Équipe du chantier au front.

18- Site shift at the tunnel face.

objectif était de dégager du temps sur les travaux 2017 afin d'éventuellement les optimiser ou les compléter. Chose faite, le creusement de l'issue de secours, qui avait pu être démarré quelques semaines avant le percement de la section principale, a été mené à son terme avant la remise en circulation du 10 décembre 2016 (figure 14). Les travaux de génie civil restants ont été dans leur quasi-totalité réalisés avant l'été 2017, sur une durée de 18 semaines.

Les travaux de réseaux en tunnel existant, puis en tunnel neuf, le génie civil du Local Technique, de l'entonnement et son pilier ainsi que le revêtement des zones définies en tunnel neuf ont été au programme d'un planning chargé à réaliser dans un temps restreint. Profitant déjà d'un gain de temps issu des travaux anticipés en 2016, l'entreprise a proposé à son client de mettre en œuvre le procédé de coques préfabriquées pour revêtir le tunnel (figures 15 et 16). Cette méthode présente de nombreux avantages : pas de montage de coffrage long et encombrant, pas de démontage, pas d'outil lourd à tirer obturant le chantier et le coupant en deux, possibilité d'intensifier ou d'arrêter la pose des coques, ren-

dant un chantier vide et disponible pour d'autres tâches, possibilité de réaliser tous les masques et bétonnages en même temps, sans être à la poursuite de l'outil, etc.

En contrepartie du coût élevé, les gains obtenus en terme de flexibilité et transparence, plus qu'en rapidité nette, équivalent au coffrage métallique, ont permis au maître d'ouvrage d'introduire de nouvelles tâches dans le tunnel, comme la régénération des 100 premiers mètres du tunnel existant ainsi que toutes les VRD de celui-ci, non prévues initialement. L'ouvrage de casquette a aussi été réalisé avec cette méthodologie donnant un résultat d'ensemble satisfaisant (figure 17).

UNE RÉUSSITE DE TOUS LES ACTEURS

Ce projet sera marqué par l'incroyable dynamisme de tous les acteurs, le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et l'entreprise dont l'unique but était, sans déroger à la sécurité, d'assurer le respect du délai, synonyme de délivrance pour toute une vallée (figure 18). L'entreprise Eiffage Génie Civil a mis en œuvre toute la rigueur et l'énergie nécessaires pour répondre au lourd engagement qu'elle avait accepté de prendre, comme dans une course-relais, en assurant le rôle de « dernier coureur » du parcours technique et engagé qu'a représenté la réalisation de la dérivation du grand tunnel du Chambon. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

- EXCAVATION : 40 000 m³**
- CINTRES TH ET CARRURES : 10 t**
- BOULONS RADIAUX : 5 000 m**
- BOULONS DE CONFORTEMENT DE PAROI : 2 500 m**
- BÉTON PROJETÉ : 4 000 m²**
- BÉTON COULÉ : 3 500 m³**
- ENROBE : 4 000 t**
- RÉSEAU INCENDIE : 1 000 m**
- CORPS DE CHAUSSÉE EN TUNNEL : 4 000 m³**
- HEURES DE TRAVAIL : 60 000 h**

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil Départemental de l'Isère (CD 38)**
- MAÎTRISE D'ŒUVRE : Groupement Quadric - Bg - Artélia**
- ENTREPRISE : Groupement Eiffage Génie Civil Région Rhône Alpes - Auvergne - Carron**

ABSTRACT

GRAND TUNNEL DU CHAMBON DIVERSION. FIVE MONTHS TO RESCUE A VALLEY

GUILLAUME CHOLLOT, EIFFAGE GÉNIE-CIVIL

The "grand tunnel du Chambon", in the Isère department of France, has suffered from worrying instability since its construction in the 1930s, requiring repeated consolidation works. A 400,000 m³ landslide occurring in April 2015 meant that the tunnel had to be closed, and with it the only road in the valley. A race against time then started. After seven months of preparation and works, a tunnel 500 metres long and of cross section 65 m² was dug with explosives, including an exceptional fork and a 170-metre emergency exit. This is quite an exploit. □

DERIVACIÓN DEL GRAN TÚNEL DE CHAMBON. 5 MESES PARA CONECTAR UN VALLE

GUILLAUME CHOLLOT, EIFFAGE GÉNIE-CIVIL

El gran túnel de Chambon, en el departamento francés de Isère, ha sufrido una preocupante inestabilidad desde su construcción en los años 30, que ha requerido reiteradas obras de refuerzo. Un deslizamiento del terreno de 400.000 m³ ocurrido en abril de 2015 obligó a cerrar el túnel y, por tanto, la única carretera del valle. Este accidente supuso el inicio de una carrera contrarreloj. Al cabo de 7 meses de preparación y de obras, se perforó con explosivos un túnel de 65 m² de sección y de 500 m de longitud, con un desvío excepcional y una salida de emergencia de 170 m. Toda una proeza. □

POUR UNE GESTION EFFICACE DES RISQUES RÉSIDUELS EN TRAVAUX SOUTERRAINS

AUTEUR : JACQUES ROBERT, EXPERT, ARCADIS

DEPUIS 2 OU 3 ANS, TOUS LES PROJETS D'OUVRAGES SOUTERRAINS INTÈGRENT UNE GESTION DES RISQUES. COMME LORS DU LANCEMENT DE LA PROCÉDURE QUALITÉ, CETTE GESTION DES RISQUES ESSAYE D'ÊTRE LA PLUS COMPLÈTE ET LA PLUS CONTRAIGNANTE POSSIBLE, AU DÉTRIMENT DE SON EFFICACITÉ ET DE SA PERTINENCE. POUR QU'ELLE SOIT CONSIDÉRÉE COMME UNE AIDE INDISPENSABLE ET NON COMME UNE CONTRAINTE DE PLUS, IL EST TEMPS DE REVENIR AUX FONDAMENTAUX.



1
© ARCADIS

INTRODUCTION

Tout projet d'ouvrage souterrain est particulièrement sensible aux incertitudes affectant aussi bien les données concernant le contexte géotechnique du site que le comportement des avoisinants. Les incertitudes sur ces données d'entrée nécessaires à la conception du projet sont à l'origine de risques qu'il convient de gérer au mieux pour

atteindre l'objectif essentiel du respect à terminaison des travaux de la qualité de l'ouvrage, de son coût et de son délai de réalisation.

Il est donc essentiel de réduire les incertitudes affectant les données d'entrée et, par voie de conséquence, les risques résiduels associés, tout en étant plus réactif en cas de survenance d'un incident en cours de travaux pour

**1- Ce que
cherche à éviter
la gestion des
risques en tra-
vaux souterrains.**

**1- What risk ma-
nagement endeav-
ours to prevent
in underground
works.**

en réduire les conséquences tant pour la sécurité des personnes que pour la poursuite des travaux.

Une telle démarche doit être initiée au plus tôt afin de réaliser les investigations nécessaires pour réduire les incertitudes et donc le nombre et la criticité des risques résiduels par une conception aboutie. Une bonne gestion de ces risques résiduels consistera alors à

N°	Risque (Risque)	Source du risque (événement redouté)	Conséquences (de l'événement redouté)	Mesures préventives intégrées dans le projet	Colonnes à compléter et/ou modifier par le candidat dans le cadre de son offre											
					Évaluation du risque résiduel après mesures préventives intégrées au projet				Mesures préventives complémentaires intégrées dans l'offre	Mesures de détection au projet et complètes éventuellement dans l'offre	Évaluation du risque résiduel après mesures préventives intégrées dans l'offre				Risque résiduel à gérer lors des travaux	
					Indéterminable	Coloc	Élevé	Niveau de Risque			Indéterminable	Coloc	Élevé	Niveau de Risque	Mesures correctives prévues au projet et complètes éventuellement dans l'offre	Type 1 : à la charge de l'entreprise 2 : rénuméré par le SPQ risque 3 : rénuméré au négociation
Tunnel creusé au tunnelier - Risques géotechniques																
G-1	Stabilité du front par perte de confinement	Pénétration d'une zone saturée très perméable (> 10 ⁻⁷ m/s)	Tassement, effacement du Tn, danger sous réservoir, effacement et canal	Procédure spécifique de pilotage du tunnelier en zone saturée Suivi continu des paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL) Suivi des déplacements dans le ZG Projection de bentonite au front en cas d'augmentation des pertes d'air comprimé Possibilité de soutènement du front par pieux ou tirants Mesures conservatoires pour les ouvrages existants (protections hors œuvre du Canal du Mail pour V1 et injection aux réseaux) Excavation en continu sous le Canal	2	2	2	4		Suivi continu des paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL) Suivi des déplacements dans le ZG				Inspection du massif pour réduire les pertes d'air comprimé et lui donner un peu de cohésion	2	Quantité correspond à une intervention (coulée béton 10m x 10m x 10m)
G-2	Défait d'expansion dans les massives	Difficulté pour imposer ces terrains	Foras, stabilité de la chambre d'échappement	Mélange soigné, utilisation de microciment Contrôle de l'efficacité du traitement par essais effectués dans des forages	2	2	2	4		Non transformé paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL) Suivi des déplacements dans le ZG				Recherche des injections	1	
G-3	Pénétration de facès rocheux saturés subissant une pression sur un linéaire plus important que celui prévu dans le MSO	Validation analytique des facès du substratum rocheux non reconnus par les sondages ponctuels	Nécessité d'appliquer la procédure de pilotage du tunnelier en zone saturée sur un linéaire plus important que celui prévu au MSO	Foras denses et sondages Suivi continu des paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL) Projection de bentonite au front en cas d'augmentation de la consommation d'air comprimé	2	1	1	2		Suivi continu des paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL) Suivi des déplacements dans le ZG				Application de la procédure spécifique de pilotage du tunnelier en zone saturée	2	
G-4	Pénétration de bancs rocheux plus agiles et/ou plus abrasifs et dure qu'attendu au MSO	Validation analytique des facès du substratum rocheux Non reconnus par les sondages ponctuels	Clous préfabriqués des outils Ratissage des cavités Vibrations importantes	Foras denses et sondages Pneu de coupe adapté pour terrasse de talus terre	2	1	1	2		Suivi continu des paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL)				Changement plus fréquent des outils (sans arrêt)	2	
G-5	Stabilité du front, perte de confinement	Sous-pénétration du Tn du substratum rocheux sans	Nécessité d'appliquer la procédure de pilotage du tunnelier en zone saturée sur un linéaire plus important que celui prévu au MSO	Foras denses et sondages Suivi continu des paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL) Projection de bentonite au front en cas d'augmentation de la consommation d'air comprimé	1	1	1	1		Suivi continu des paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL) Suivi des déplacements dans le ZG				Application de la procédure spécifique de pilotage du tunnelier en zone saturée	1	
G-6	Déstabilisation du massif dans les zones de forage	Prévalence des terrains Amalés d'eau Chargement des tubes de la voûte complète	Traitement complémentaire Retrait	Soutènement Suivi continu sur chaque tube (V1 et V2 + sondes et outils) lors et implantés avec précision Suivi des déplacements dans le ZG	1	1	1	1		Suivi continu des paramètres du tunnelier (PMP+CSG+CAL) Suivi des déplacements dans le ZG				Inspection du massif pour le retraiter de la cohésion	1	

2 © ARCADIS

définir leur traitement prévisionnel dès la conception (mesures correctives), ainsi que les auscultations permettant de détecter leur survenance au plus tôt afin d'en réduire les conséquences. Cette gestion des risques résiduels doit être poursuivie jusqu'à la réception de l'ouvrage. Par contre, elle ne doit pas conduire à un processus fastidieux, avec une liste très longue de risques de poids, très disparate, reportée dans un registre des risques à colonnes multiples dont la plupart est inutile pour la gestion au quotidien des risques, ce qui rend la démarche moins performante. Pour éviter une telle dérive contre-productive, il faut, d'une part, une conception pertinente de l'ouvrage souterrain et, d'autre part, appliquer quelques règles de simplification et motiver tous les acteurs dans l'intérêt du seul projet.

QUELQUES PIÈGES À ÉVITER

Pour aboutir à une gestion efficace des risques résiduels qui auront été réduits au préalable le plus possible en nombre et en criticité, de nombreux pièges sont à éviter. Les sept majeurs sont les suivants :

→ Éviter le déshabillage du projet au stade des études de conception puis des études d'exécution car il ne peut conduire qu'à l'accroissement des risques qu'aucun acteur ne voudra prendre à sa charge ;

2- Exemple de registre des risques (RR), volet risques géotechniques.

2- Exemple of a risk register (RR), geotechnical risks section.

- Ne pas chercher à identifier tous les risques imaginables, mais s'attacher aux risques les plus critiques pour le projet afin d'éviter toute dispersion et perte d'efficacité ;
- Vis-à-vis des avoisinants, ne pas fixer des seuils à ne pas dépasser irréalistes qui se traduiront au mieux par un refus de l'entreprise d'assumer ses responsabilités en considérant ces objectifs comme inatteignables, au pire par la mise en œuvre de dispositions constructives fort coûteuses et donc non optimisées à la charge du maître d'ouvrage (il est préférable de réparer des désordres esthétiques que de mettre en œuvre des traitements préventifs exorbitants) ;
- Ne pas traiter toutes les incertitudes géotechniques en risques, mais

choisir des méthodes permettant de les accepter sans dispositions constructives complémentaires non prévues ;

- Ne pas chercher à transmettre tous les risques à l'entreprise, mais plutôt la motiver pour optimiser les conditions de réalisation des travaux ;
- Ne pas transformer cette gestion des risques résiduels en « usine à gaz » afin qu'elle reste une aide pour la conduite des travaux et non une contrainte supplémentaire subie et inefficace ;
- Ne pas compter sur les divers assureurs pour prendre en charge les petits désordres (sur l'ouvrage ou sur les avoisinants), alors que leur champ d'action doit concerner les risques identifiés « peu probables » et les risques non identifiés.

QUELQUES POINTS CLÉS POUR RÉUSSIR

Pour aboutir à une gestion efficace des risques résiduels, il faut un leader ayant la compétence, la longévité pour un accompagnement de la conception jusqu'à la réception de l'ouvrage et l'indépendance nécessaire : seule l'ingénierie en charge de la maîtrise d'œuvre de ce projet répond à ces critères. Il peut alors appliquer la progressivité

de la démarche selon les trois étapes fondamentales :

- Une réduction au plus tôt des incertitudes en phase conception par des investigations et études successives pour fiabiliser les données d'entrée ;
- Un choix de conception robuste vis-à-vis des incertitudes restantes ;
- Un choix pertinent des méthodes et moyens en matériels qui sera validé ou adapté par l'entreprise au stade de la consultation.

Dès le début des études, l'ingénierie hiérarchise les risques identifiés dans un registre des risques RR (figure 2) pour éviter une liste « à la Prévert » et pouvoir retenir les bonnes options tant pour réduire les incertitudes les plus impactantes que leurs conséquences. Pour cela, l'ingénierie leur attribue un niveau de risque NR (figure 4) égal au produit de leur vraisemblance par leurs conséquences évaluées selon des échelles les plus explicites possibles et validées par le maître d'ouvrage (figure 3). Ainsi l'ingénierie :

- En phase Avant-projet (AVP), traite les risques initialement inacceptables pour obtenir en fin d'AVP un NR < 10 et prévoit pour les risques importants une provision pour risques identifiés (PRI) adaptée à ce niveau d'étude.

- En phase Projet (PRO), vérifie l'absence de risque inacceptable et traite les risques importants pour obtenir en fin de PRO un NR < 5. Elle définit les PRI pour les risques significatifs et les quelques risques importants qui n'ont pas pu être réduits.
- En phase Consultation des entreprises (DCE), propose au maître d'ouvrage une contractualisation pour le marché de l'entreprise la plus transparente possible en l'incitant à s'approprier le management des risques réalisé à ce stade et à le compléter en fonction de son savoir-faire par un choix judicieux des méthodes et des moyens en matériels qu'elle mettra en œuvre pour réduire les risques résiduels. Il en découle un RR contractuel avec éventuellement l'ajout ou la suppression de risques et une nouvelle hiérarchisation.

Dans ce RR contractuel, sont reportées les mesures de détection au plus tôt de la survenance de chaque risque, ce qui suppose en permanence une surveillance et une vigilance pour une meilleure efficacité.

Les mesures correctives pertinentes sont prédéfinies et de mise en œuvre rapide, en distinguant, si nécessaire, la mise en sécurité du chantier des mesures pour la reprise des travaux.

Enfin, un programme d'assurances cohérent pour tous les acteurs doit permettre de ne pas modifier leur comportement afin de défendre leurs intérêts particuliers au détriment de l'intérêt général du projet :

- Une assurance Tous Risques Chantier (TRC) commune et sans recours, souscrite par le maître d'ouvrage et à ses frais, couvre les risques non identifiés et les risques identifiés mais à très faible vraisemblance (improbables) affectant l'ouvrage en cours de réalisation.

- Une assurance en Responsabilité Civile (RC) couvre chaque acteur vis-à-vis des sinistres causés aux tiers au-delà d'un certain montant (franchise) fonction de son poids économique et de son engagement dans la réalisation du projet. Pour une meilleure efficacité, c'est l'assurance RC du maître d'ouvrage qui est mobilisée vis-à-vis du tiers, et qui exerce son recours vis-à-vis des constructeurs si cela est pertinent.

DOCUMENTS SUPPORT DE LA GESTION DES RISQUES EN PHASE CONSULTATION ET EN PHASE TRAVAUX

En phase consultation des entreprises, les documents supports de la gestion des risques viennent compléter les pièces techniques du dossier de consultation des entreprises (DCE) (figure 5). Le plan de management des risques (PMR), document destiné à être contractualisé au même titre que le CCTP dont il est un complément, précise la méthodologie mise en œuvre en matière de gestion des risques résiduels, tant au stade de la conception qu'au stade de la réalisation des travaux.

Le PMR précise les risques résiduels identifiés au stade de la conception, les mesures préventives intégrées dans la conception pour réduire leur niveau de risque (NR), les conséquences prévisibles en cas de survenance et les mesures correctives à mettre en œuvre

3- Exemple de qualification de la vraisemblance et des conséquences coût - délai.

3- Example of classification of probability and cost-deadline consequences.

EXEMPLE DE QUALIFICATION DE LA VRAISEMBLANCE ET DES CONSÉQUENCES COÛT - DÉLAI

Description de la vraisemblance	Qualification	Note
Supérieur à 50% dans la durée de vie du risque (une majorité de personnes estiment l'évènement possible)	Possible	4
Entre 20% et 50% dans la durée de vie du risque (plusieurs personnes estiment l'évènement possible)	Peu probable	3
Entre 5% et 20% dans la durée de vie du risque (quelques personnes estiment l'évènement possible)	Très peu probable	2
Inférieur à 5% dans la durée de vie du risque (presque personne imagine l'évènement possible)	Improbable	1
Description de la conséquence « coût »		
Description de la conséquence « coût »	Qualification	Note
Dépassement supérieur à 10% du coût du projet	Très forte	4
Dépassement entre 7,5% et 10% du coût du projet	Forte	3
Dépassement entre 0,5% et 2,5% du coût du projet	Moyenne	2
Dépassement inférieur à 0,5% du coût du projet	Faible	1
Description de la conséquence « délai »		
Description de la conséquence « délai »	Qualification	Note
Retard supérieur à 25% du délai global	Très forte	4
Retard de 10% à 25% du délai global	Forte	3
Retard de 5% à 10% du délai global	Moyenne	2
Retard inférieur à 5% du délai global	Faible	1

EXEMPLE DE QUALIFICATION DU NIVEAU DE RISQUE NR

Niveau de risque NR				
Conséquences				
Vraisemblance:	1 – Faibles	2 – Moyennes	3 – Fortes	4 – Très fortes
4 – Possible	4	8	12	16
3 – Peu probable	3	6	9	12
2 – Très peu probable	2	4	6	8
1 – Improbable	1	2	3	4

NR	Qualification	Actions
16 à 12	Inacceptable (inadmissible)	Viabilité du projet remise en cause, action de traitement à mettre en œuvre immédiatement
9 à 6	Important (à surveiller)	Action de traitement à mettre en œuvre pour le réduire ou l'annuler
4 à 2	Significatif (acceptable)	Action de vigilance accrue sur toute la période active
1	Négligeable (mineur)	Aucune action requise, simple surveillance

© AFRCADIS
4

tant pour assurer la mise en sécurité du chantier que pour permettre la poursuite des travaux.

Le PMR précise les conditions de prise en charge des mesures correctives pour chaque risque résiduel identifié, en se référant à trois cas types :

- Les risques pris en charge par le titulaire aussi bien en termes de coût que de délai : les mesures correctives mises en œuvre ne font pas l'objet d'une rémunération ni d'une modification de délai. Ces risques sont normalement de deux natures : les risques liés à la maîtrise d'une technique de construction et donc au savoir-faire de l'entreprise, et les risques géotechniques de conséquence maîtrisée qui peuvent être couverts par le titulaire sans un bouleversement complet de l'équilibre financier de son marché.
- Les risques partagés entre l'entreprise et le maître d'ouvrage : les mesures correctives mises en œuvre sont rémunérées par application des prix unitaires (PU) du Bordereau de Prix Unitaires (BPU Risques), sans prise en compte d'une éventuelle incidence sur le délai.
- Les risques dont les mesures correctives ne font pas l'objet d'une rémunération préalable. Il s'agit de

4- Exemple de qualification du niveau de risque NR.

4- Example of classification of the risk level ("NR").

risques considérés comme peu probables et pour lesquels la définition d'un PU représentatif de la prise en charge du risque aurait présenté un coût disproportionné en regard du niveau de risque couvert, ou pour lesquels la définition d'un PU opérationnel n'est pas possible (réparation des dommages sur avoisinants par exemple). Si un tel risque devait survenir, les mesures de mise en sécurité et/ou correctives feraient alors l'objet d'une validation par le Comité de suivi des risques (CSR) et d'un règlement en cours de travaux, sur demande motivée de l'entreprise.

L'affectation des risques doit être faite selon une règle pertinente. Chaque risque doit rester à la charge de celui qui est le plus impliqué dans sa prévention tout en tenant compte de sa

capacité financière : ainsi, les principaux risques géotechniques et ceux liés aux avoisinants (tout en respectant les seuils définis) restent à la charge du maître d'ouvrage, les risques liés à une erreur de conception à la charge du maître d'œuvre, ceux liés à un défaut de mise en œuvre des méthodes ou à des matériels non efficaces à l'entreprise.

Les délais du marché sont réputés inclure l'ensemble des prestations résultant de l'application du devis quantitatif indicatif (DQI Risques pris en compte pour estimer la provision pour risques identifiés PRI) au BPU Risques. Les surveillances, suivis et contrôles habituels permettant de détecter au plus tôt toute anomalie, ainsi que la mise en œuvre des actions préventives permettant de réduire les risques identifiés, ne font pas l'objet de rémunération complémentaire (elles sont définies dans le registre des risques RR).

Le PMR contient trois annexes :

- Le registre des risques RR : il permet de finaliser le contenu du BPU Risque et du DQI Risques, documents nécessaires pour quantifier la PRI. Les risques résiduels sont classés dans le RR selon leur catégorie (risques administratifs et réglementaires, risques d'interfaces, risques techniques : géotechniques, avoisinants, environnement, méthodes et matériels), et leur NR décroissant.

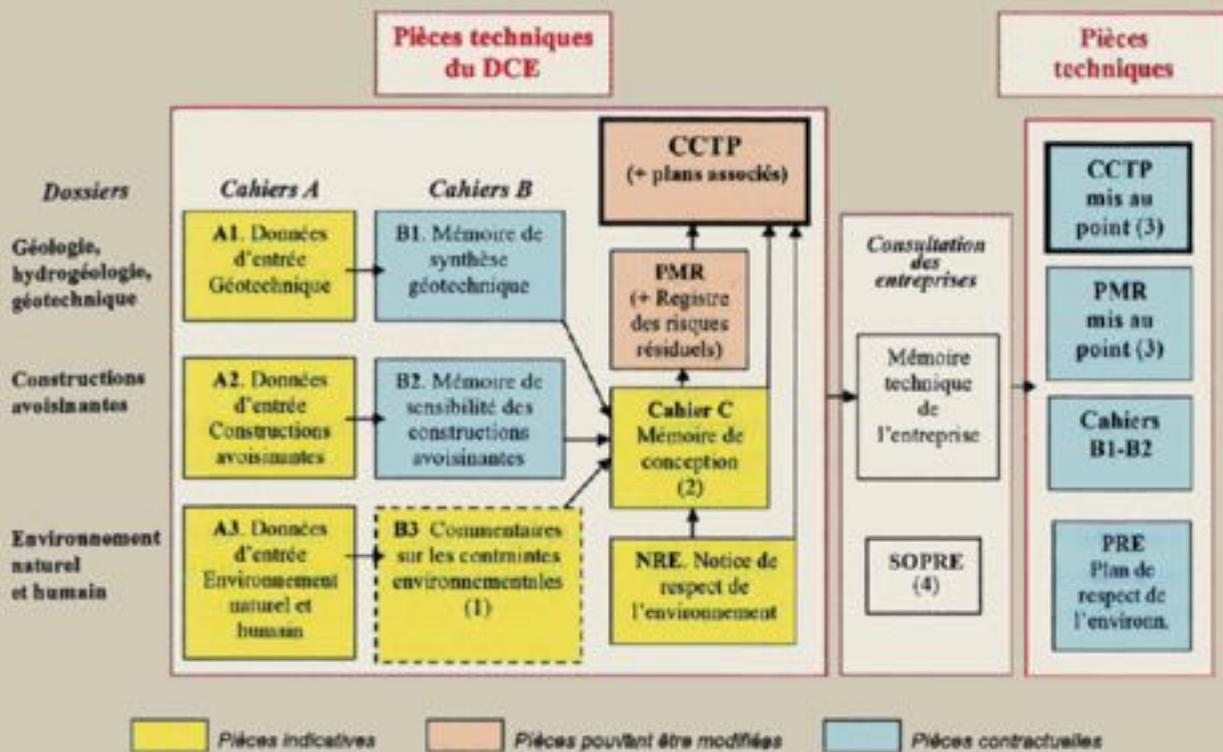
→ Le modèle de fiche de suivi de risque (une fiche par risque identifié, initialisée au démarrage des études d'exécution et mise à jour pendant les travaux).

→ Le modèle de fiche de suivi d'incident (une fiche par incident survenu, mise à jour en fonction des mesures correctives réalisées).

Le dossier Risques intégré au DCE comprend le PMR, le RR, le BPU Risques et le DQI : ces documents sont établis au stade de la phase projet. Le dossier Risques est contractualisé dans le cadre de l'établissement du marché de travaux.

Il est souhaitable de proposer au maître d'ouvrage, dans le cadre d'un marché négocié, de demander aux entreprises de compléter le PMR, le RR et éventuellement le BPU Risques et le DQI en incorporant leurs propositions concernant les risques identifiés (risques complémentaires ou suppression de risques compte tenu de leurs matériels et/ou méthodes proposées), les mesures préventives et/ou de détection complémentaires ainsi que les mesures correctives complémentaires éventuelles avec leur mode de rémunération (PMR et RR complétés, BPU Risques et DQI adaptés).

ARTICULATION DES PIÈCES TECHNIQUES DU DCE ET DU MARCHÉ



- (1) Le cahier B3, qui est facultatif, peut être contractualisé ou non par le maître d'ouvrage.
 (2) Y compris le Registre des risques en phase Conception
 (3) À l'initiative du maître d'ouvrage, des compléments issus du Mémoire de l'entreprise peuvent être apportés au CCTP et au PMR lors de la mise au point du marché
 (4) Schéma organisationnel du Plan de respect de l'environnement

5

© AFTES GT32-3

Pour une totale transparence vis-à-vis des candidats, l'analyse technique des offres doit prendre en considération, pour la part concernant le management des risques, la pertinence des propositions concernant le dossier Risques. Pour l'analyse financière des offres, le BPU Risques et le DQI adapté ne sont pas pris en considération : par contre, ils sont éventuellement intégrés dans le dossier Risques lors de la finalisation du marché avec l'entreprise jugée la mieux-disante.

Le management des risques évolue pendant l'exécution des travaux, aussi bien lors des études d'exécution que pendant les travaux eux-mêmes : en particulier, cette évolution concerne la capitalisation des REX, l'évolution des FR établies initialement par l'entreprise lors des études d'exécution, l'établissement des FI, l'établissement des Fiches de Risques Non Identifiés (FNRI).

Un Comité de Suivi des Risques (CSR), composé de représentants du maître

d'ouvrage, du maître d'œuvre, du coordonnateur SPS et de l'entreprise, se réunit au minimum tous les mois pour faire le point sur l'évolution des risques, l'analyse des FI et la capitalisation des REX en particulier.

CAS PARTICULIER DES RISQUES RÉSIDUELS VIS-À-VIS DES AVOISINANTS

Les avoisinants situés dans la zone d'influence géotechnique (ZIG) font l'objet d'une enquête de sensibilité synthétisée dans le mémoire de sensibilité des avoisinants : ils sont classés en trois catégories : très sensible, sensible et peu sensible.

Pour chaque catégorie de sensibilité et en fonction des types de dommages à l'avoisinant considérés comme acceptables par le maître d'ouvrage, à savoir :

→ **Type 1** : dommages architecturaux (fissures millimétriques facilement réparables, frottement des portes ou fenêtres) ;

5- Articulation des pièces techniques du dossier de consultation des entreprises (DCE) et du marché.

5- Links between the technical parts of the tender documents and the contract.

→ **Type 2** : dommages fonctionnels (fissures pluri-millimétriques pouvant affecter des éléments structuraux, coïncement des portes ou fenêtres, fonctionnalité de la construction réduite) ;

→ **Type 3** : dommages structurels (dégradation des éléments structuraux principaux avec reconstruction partielle ou totale nécessaire).

Sont définis des seuils d'apparition pour chaque type de dommage en termes de tassement absolu, de tassement différentiel et de déformation horizontale.

Le choix du type de dommage acceptable par le maître d'ouvrage est un choix économique : la réparation d'un dommage peut coûter bien moins cher que la mesure préventive pour l'éviter, à condition bien sûr qu'il n'y ait pas de mise en danger d'une personne. Cette étude de sensibilité des avoisinants (bâti, réseaux et ouvrages enterrés), qui conduit à la définition des seuils à ne pas dépasser, est généralement confiée par le maître d'ouvrage à un spécialiste en bâtiments qui intervient en tant qu'assistant à maître d'ouvrage (AMO).

L'impact des travaux sur les avoisinants est estimé dans le cadre des études de conception, puis validé ou adapté dans le cadre des études d'exécution. La comparaison de cet impact estimé à la sensibilité de l'avoisinant (seuils à ne pas dépasser) permet de déterminer sa vulnérabilité (risque de création d'un dommage).

Il est proposé au maître d'ouvrage d'accepter le risque de dommages

du type 1 afin de ne pas alourdir les mesures préventives spécifiques à mettre en œuvre au droit des avoisinants (éviter les améliorations de terrains d'assise voire le renforcement des structures, à ne conserver que pour les avoisinants considérées comme très vulnérables en fonction de l'impact estimé des travaux sur l'avoisinant). Les seuils contractuels à ne pas dépasser sont alors les seuils d'apparition des dommages fonctionnels.

La prise en charge du risque est alors bien définie pour chaque avoisinant. Si le seuil contractuel n'est pas dépassé, tout dommage éventuel est à la charge du maître d'ouvrage : si le seuil est dépassé, il est alors à la charge de l'entreprise.

Pour gérer dans des conditions optimales de délai et de coût les réparations de ces dommages architecturaux (type 1), et pour réduire l'impact négatif sur l'image du chantier de la part de l'occupant de l'avoisinant concerné, il est conseillé au maître d'ouvrage de prévoir un marché spécifique de réparation des dommages, suivi par le maître d'œuvre. Cela permet d'éviter des procédures longues et coûteuses avec l'intervention des experts d'assurance. La prise en charge financière est transférée à l'entreprise dans le cas où l'un des seuils contractuels a été dépassé.

Ainsi, dans le CCTP et le PMR, est défini ce principe général de prise en charge pour les avoisinants. Seuls les avoisinants présentant un risque résiduel jugé important sont identifiés dans le RR, avec les mesures préventives et correctives correspondantes.

Pour éviter les réclamations abusives des occupants des avoisinants, il est recommandé de faire réaliser soit des constats d'huissier, soit des référés préventifs avant tous travaux. Toutefois, pour limiter en zone fortement urbanisée le coût et le temps passé consacrés à ces procédures, il peut être envisagé de les réserver aux avoisinants considérés comme vulnérables (constats d'huissier) ou très vulnérables (référé préventif). Ces procédures doivent concerner aussi bien les parties communes que les parties privatives.

FAUT-IL MOTIVER LES INTERVENANTS AU PROJET ?

Pour la réussite de la gestion des risques, il faut mobiliser les compétences techniques des acteurs plutôt que leurs compétences contractuelles, et cela à chaque étape. Pour les motiver davantage, on peut définir quelques règles incitatives.

En phase conception, le maître d'œuvre doit être incité à optimiser le projet et non à le déshabiller pour respecter un budget trop contraint. En cas de

découverte d'un risque, il faut inciter à le traiter plutôt qu'à le sous-estimer. À ce stade, il ne doit pas être prévu de malus mais plutôt un bonus si la conception est pertinente sous l'angle qualité de l'ouvrage, coût y compris PRI, délai de réalisation.

En phase travaux, le maître d'œuvre peut être motivé par un bonus/malus en fonction du résultat traduit en termes de qualité, coût et délai. Ce bonus/malus est à plafonner (par exemple à 5% du montant de son marché) et peut être calculé sur la base de la différence entre le coût à terminaison défini à la signature du marché de l'entreprise (y compris PRI) et le coût réel (par exemple 10% de cette différence). De même, l'entreprise peut être motivée par un bonus/malus plafonné et calculé comme pour le maître d'œuvre, mais avec des taux adaptés à sa puissance financière (par exemple, 40% de la différence entre le coût à terminaison défini à la signature de son marché et le coût réel, plafonné à 10% de son marché).

CONCLUSION

Pour que la gestion des risques atteigne son objectif de maîtrise de la qualité, du coût et du délai de réalisation d'un projet, il ne faut pas vouloir en faire une panacée pour résoudre tous les problèmes du quotidien du chantier.

Pour être considéré par tous les acteurs comme un outil et non comme une contrainte supplémentaire, cette gestion des risques doit être simplifiée le plus possible pour ne s'intéresser qu'aux risques importants et significatifs.

Elle doit établir des règles simples, les incidents mineurs étant plutôt traités sur des bases contractuelles classiques.

Il est nécessaire de motiver tous les acteurs sur le résultat à obtenir (bonne conception qui permet une bonne réalisation, en réduisant au maximum les risques résiduels) pour éviter tout détournement du processus de gestion des risques, qui pourrait consister par exemple pour l'entreprise à rattacher tout incident à un risque non identifié pour sortir du cadre de la gestion des risques établi.

Le risque zéro n'existant pas et l'exhaustivité dans l'identification des risques n'étant pas garantie, la mise en place en phase travaux d'un comité de suivi des risques permet de faciliter la résolution d'incidents liés à des risques non identifiés.

Enfin une bonne gestion des risques résiduels en travaux souterrains ne consiste pas à mobiliser le plus possible les assureurs des intervenants, mais plutôt à ne les faire intervenir que lors de la survenance d'incidents importants. □

ABSTRACT

FOR EFFICIENT MANAGEMENT OF RESIDUAL RISKS IN UNDERGROUND WORKS

JACQUES ROBERT, ARCADIS

Risk management should make it possible to optimise the cost of a tunnel by identifying the main risks in order to be more proactive when they occur and attenuate their consequences. It is essential not to make the approach complex, and thus a matter for specialists: it is crucial to use terminology that is understandable by everyone and stick to the fundamentals of risk analysis and their handling. In each design phase, the identified uncertainties are reduced in order to end up with a limited number of residual risks for the invitation to tender. The register (table) of identified risks will be simplified regarding both the content of the columns (distinguish between "uncertainty", "feared event", "consequences of the feared event") and the layout of the rows (risks classified in succession by type of structure, type of risk and decreasing criticality). Contracting authorities, engineering firms and contractors are the risk management players, and the contractual arrangements must not disempower any of them. The tasks of monitoring each risk and handling its consequences are clearly assigned, and all these players can be given an interest in the result of this risk management based on a comparison between the termination cost (estimated cost + provisions for identified risks) and the final cost of the works: this breakdown can be made according to the role of each player and their economic weight in the project. Accordingly, risk management will be sought after assistance for works management and not an unwanted constraint. □

PARA UNA GESTIÓN EFICAZ DE LOS RIESGOS RESIDUALES EN OBRAS SUTERRÁNEAS

JACQUES ROBERT, ARCADIS

La gestión de los riesgos debe permitir optimizar el coste de una obra, identificando los principales riesgos para reaccionar lo antes posible cuando aparecen y reducir sus consecuencias. No se debe complicar el procedimiento, lo que lo convertiría en tarea para especialistas: se debe emplear una terminología comprensible por todos y ceñirse a los fundamentos del análisis de los riesgos y su tratamiento. En cada fase de diseño, deben reducirse las incertidumbres detectadas para llegar, durante la consulta con las empresas, a un número limitado de riesgos residuales. El registro (cuadro) de riesgos identificados debe simplificarse tanto en el contenido de las columnas (diferenciar "incertidumbre", "suceso temido", "consecuencias del suceso temido") como en la ordenación de las líneas (riesgos clasificados sucesivamente por tipo de construcción, tipo de riesgo y criticidad decreciente). Los directores de obra, los ingenieros y las empresas son los interlocutores en la gestión de los riesgos, cuya contractualización no debe provocar su respectiva desresponsabilización. La vigilancia de cada riesgo y el tratamiento de sus consecuencias deben atribuirse sin ambigüedades y todos estos actores pueden estar interesados en el resultado de esta gestión de los riesgos basadas en la comparación entre el coste a la terminación (coste previsto + provisiones para riesgos identificados) y el coste final de las obras: este reparto puede realizarse en función del papel de cada uno y de su peso económico en el proyecto. Así, la gestión de los riesgos será una ayuda deseada para la realización de las obras y no una restricción. □



1

© EIFFAGE

GALERIE DES JANOTS - ACHEMINEMENT D'EAU DE LA DURANCE ENTRE LES COMMUNES DE CASSIS ET DE LA-CIOTAT (13)

AUTEURS : AURÉLIEN MARTINEZ, RESPONSABLE MOE, CABINET MERLIN - MARC DHIERSAT, DIRECTEUR DE CHANTIER, EIFFAGE - PASCAL VERBAEYS, RESPONSABLE PRODUCTION, EIFFAGE - MARIE LESIMPLE, GÉOLOGUE MEMBRE DU GT7, EIFFAGE - THIERRY HECK, CHARGÉ MISSION G4, ARCADIS

L'ALIMENTATION EN EAU BRUTE DE LA COMMUNE DE LA-CIOTAT, À PARTIR DU CANAL DE MARSEILLE, EMPRUNTE LE TUNNEL SNCF DES JANOTS. LA VIEILLESSE DES INSTALLATIONS ACTUELLES, L'INTERFÉRENCE DE LEUR MAINTENANCE AVEC L'EXPLOITATION FERROVIAIRE ET L'INSUFFISANCE DE LEUR CAPACITÉ EN PÉRIODE ESTIVALE NOTAMMENT, ONT CONDUIT LA MÉTROPOLE AIX MARSEILLE PROVENCE A LA CRÉATION D'UNE GALERIE D'ALIMENTATION EN EAU BRUTE DE 2 750 m DE LONGUEUR ET D'UN DIAMÈTRE INTÉRIEUR MINIMUM DE 3 m.

LE PROJET

Le territoire Est de la Métropole Aix Marseille Provence, constitué par les communes de Cassis, Roquefort-la-Bédoule, La-Ciotat et Ceyreste, est alimenté en eau brute par une branche du canal de Marseille : la dérivation de La-Ciotat (figure 2). Cette branche franchit le

massif de Carpiagne, par le souterrain du Mussuget, pour arriver à Cassis. La dérivation atteint La-Ciotat en franchissant le massif de la Couronne de Charlemagne par le tunnel SNCF des Janots. Les installations relatives au canal existant, dans le tunnel SNCF des Janots, ont les caractéristiques suivantes :

1- Galerie creusée.

1- The driven gallery.

- Installations anciennes (1956/1964) et vétustes ;
- Difficilement exploitables car interférant avec l'exploitation du tunnel SNCF ;
- Capacité de transit limitée à 330 l/s, largement insuffisante en période estivale notamment.

L'objet du projet est la création d'une galerie technique indépendante permettant de répondre au besoin de la population. Cette galerie est dénommée la galerie des Janots.

SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA GALERIE DES JANOTS

Les travaux consistent en la réalisation d'une galerie de 2750 m de longueur, parallèle au tunnel SNCF, entre le siphon des Janots (amont) et le siphon du Pain-de-Sucre (aval) ainsi que l'aménagement de ces siphons. Le chantier comporte trois zones (figure 3) :

- La zone amont, sur la commune de Cassis, localisation : de la tête amont de la nouvelle galerie jusqu'au raccordement entre les ouvrages existants sur la nouvelle galerie ;
- La galerie, sur les communes de Cassis et de La-Ciotat, sous le domaine du Parc National des Calanques, sur un linéaire total de 2750 m entre les chambres d'accès amont et aval ;

→ La zone aval, sur la commune de La-Ciotat, localisation : de la tête aval de la nouvelle galerie jusqu'au raccordement des ouvrages existants à la nouvelle galerie. Les installations de chantier et l'attaque principale du creusement sont situées dans cette zone.

2- Schéma hydraulique de l'alimentation en eau brute de la commune de La-Ciotat.

3- Localisation de la galerie des Janots.

2- Hydraulic diagram of the raw water supply for La-Ciotat commune.

3- Location of the Janots gallery.

LA COUPE TRANSVERSALE FONCTIONNELLE

Le gabarit de la future galerie est de 3,0 m intérieur utile (figure 4) ; pour cela, le diamètre excavé est de 3,5 m permettant la mise en place du soutènement et la tolérance d'exécution. La galerie est équipée après creusement d'une cunette 70x70 cm qui permet de faire transiter un débit gravitaire objectif de 450 l/s d'eau brute.

La conception de cet ouvrage permet d'y intégrer, ultérieurement, une conduite d'adduction d'eau potable dn900 assurant 1 000 l/s de débit.

GÉOLOGIE ET RECONNAISSANCES COMPLÉMENTAIRES

Le projet se situe sur la bordure occidentale du bassin du Beausset, constitué de terrains d'âge Crétacé formant des auréoles emboîtées, dont les couches plongent faiblement vers la tête aval de la future galerie (figure 5). Les formations traversées comportent des terrains sédimentaires d'origine

continentale (grès) et des roches carbonatées (calcaires), marqués par de nombreuses variations latérales de faciès, générées par une tectonique synsédimentaire. Les formations carbonatées affleurent sur le plateau de la Couronne de Charlemagne, point culminant du massif traversé par le projet, et constituent une surface structurale intensément lapiazée.

L'unité du Beausset connaît peu d'écoulement de surface pérenne. Ces derniers semblent concentrés au niveau des sources. Cependant il existe un risque non négligeable de rencontrer des systèmes aquifères de type karstique, notamment dans les horizons calcaires, provoqués par les variations des niveaux marins au quaternaire.

Le tracé de la galerie des Janots recoupe une série sédimentaire monoclinale à faible pendage, constituée de :
 → Barres calcaires blanchâtres souvent fossilifères, recoupées notamment sur l'attaque aval de la galerie (C3R inf. et C3R sup.) ;

SCHÉMA HYDRAULIQUE DE L'ALIMENTATION EN EAU BRUTE DE LA COMMUNE DE LA-CIOTAT



2

© MÉTROPOLE AIX MARSEILLE PROVENCE

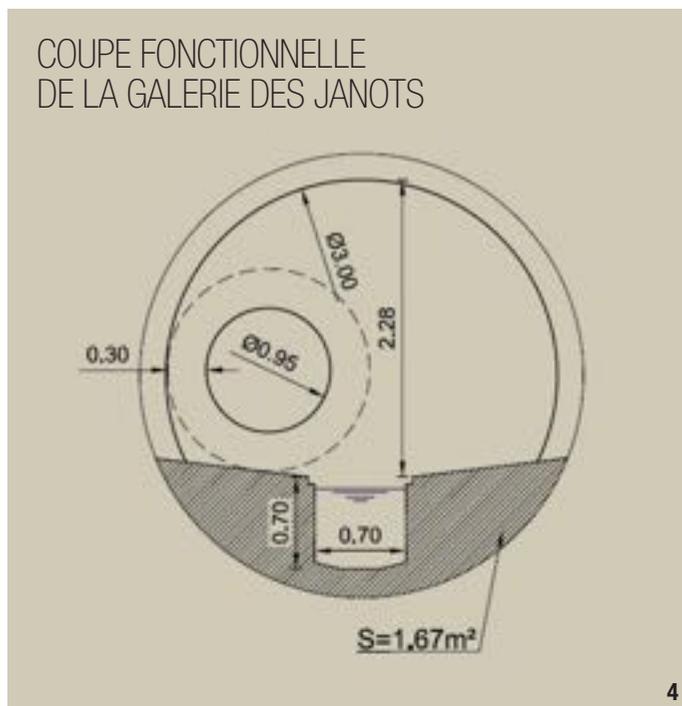
LOCALISATION DE LA GALERIE DES JANOTS



3

© CABINET MERLIN

- Calcaires gréseux et grès coquilliers, de teinte rousse, à stratification oblique, représentant le front d'un ancien delta (C3G) ;
- Marnes et calcaires marneux, en alternance avec des formations marno-gréseuses, du centre du tracé jusqu'à l'attaque amont (C3M). Après les études géologiques initiales réalisées en phase DCE (9 sondages mixtes destructifs/carottés, réalisés depuis la surface sur des profondeurs variables de 15 à 105 m, pour un total de 550 m), une mission de reconnaissances géologiques complémentaires a été réalisée dans le cadre de la mission G3. Elle a intéressé les deux attaques du projet, et le Parc National des Calanques le long de la trace, pendant la période de préparation du projet (8 à 10 mois) et comprend :
 - 35 m de sondage verticaux carottés, et 70,4 m de sondages pressiométriques effectués sur les attaques amont et aval ;
 - 250 m de sondage carotté horizontal réalisé depuis le tympan aval du projet ;
 - Des investigations géophysiques de surface de type panneaux électriques et tomographie sismique réalisées sur 2400 m de tracé ;
 - Une cartographie de surface détaillée des affleurements situés dans la zone du projet



Sur la base des résultats des reconnaissances précédentes, et en particulier de la prospection géophysique, 409 m de sondages longs verticaux mixtes complémentaires ont été réalisés au droit de la trace dans le Parc National des Calanques pour apporter des informations sur des secteurs présumés sensibles.

- 4- Coupe fonctionnelle de la galerie des Janots.
- 5- Coupe géologique.
- 4- Functional cross section of the Janots gallery.
- 5- Geological cross section.

Les résultats des reconnaissances géologiques complémentaires ont été ensuite intégrés au profil en long géologique prévisionnel et ont permis d'établir un zonage des risques sur le linéaire du projet et d'identifier le risque karstique sur un linéaire de 1748 m (C3R et C3G), avec une probabilité d'occurrence plus ou moins élevée. Ce zonage a également permis de distinguer les zones courantes (1847 m) des zones à risque d'aléa élevé (903 m).

LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

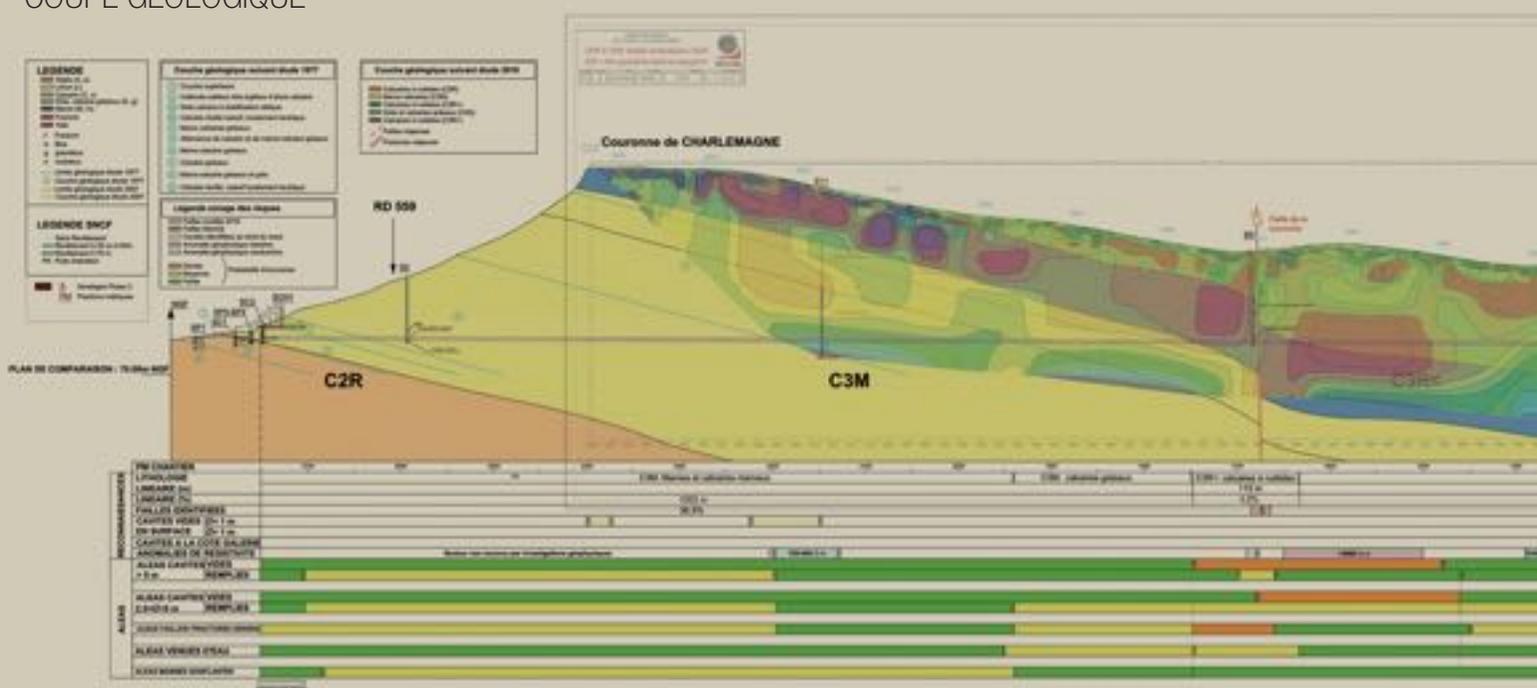
Le site est situé dans une zone semi-urbaine à fort relief, contraint d'une part par sa proximité à la RD 559 (13500 véhicules/jour), à la voie ferrée internationale Vintimille-Marseille et à 3 rive-rains (<25 m), et d'autre part par les contraintes environnementales : Parc National des Calanques, ZNIEFF de type 2 et site Natura 2000.

ADAPTATION DES INSTALLATIONS DE CHANTIER AUX CONTRAINTES DU SITE

Dans le but de répondre aux besoins du chantier et de respecter les contraintes du site, les installations de chantier ont été réparties sur deux aires (figure 6) :

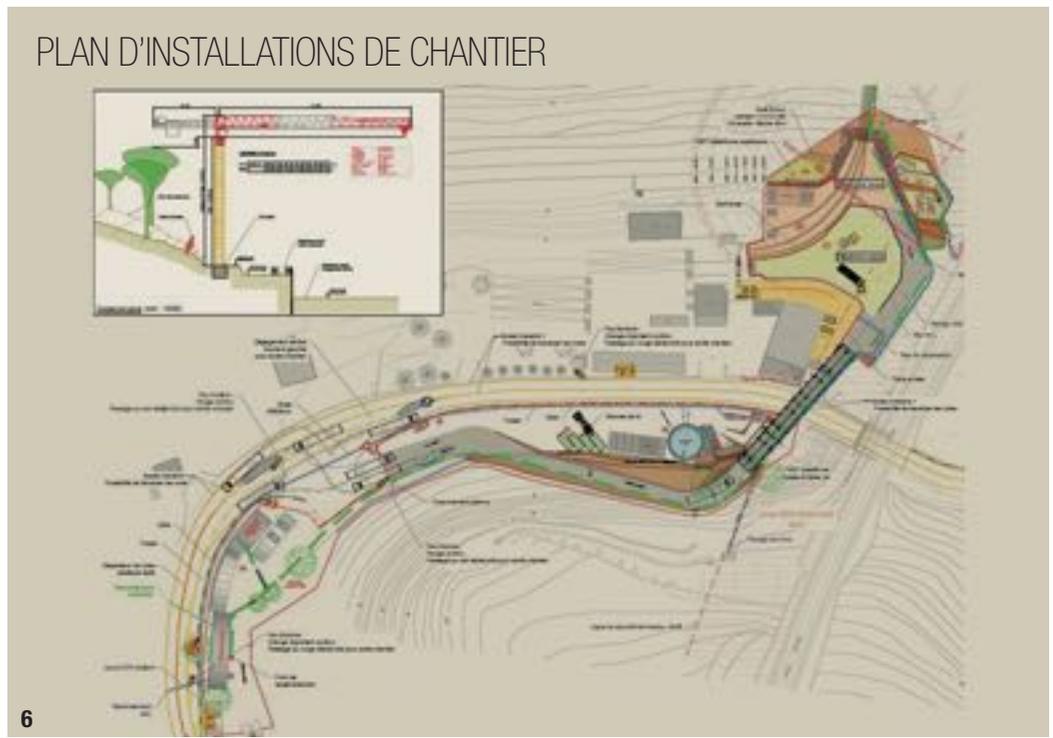
- L'une au sud-est de la RD 559, bureaux et baraques de chantier, zones de stockage et accès au chantier.

COUPE GÉOLOGIQUE



→ L'autre au nord-ouest de la RD 559, cette aire est divisée en deux plateformes adaptées au contexte montagneux. Le soutènement entre plateformes est réalisé à l'aide de parois berlinoises ou de Terre Armée de 6 m de hauteur. La plateforme haute constitue l'arrière-gare du convoi d'acheminement du matériel et du personnel vers le front de taille et d'évacuation du marin hors galerie. La plateforme basse est réservée à la gestion et évacuation des déblais. L'ensemble de cette plateforme est survolé par une grue à tour (figure 7).

Un pont-route provisoire de 55 m franchit la RD 559, assurant la continuité en toute sécurité entre ces deux aires. L'accès au chantier est protégé par un système de feux de circulation asservi aux flux entrants et sortants. Des adaptations spécifiques ont été réalisées pour permettre aux riverains de conserver l'accès à leur habitation.



CHOIX DE LA MÉTHODE DE CREUSEMENT

Compte tenu de la longueur de la galerie, du contexte géologique et environnemental ainsi que du planning de l'opération, le maître d'œuvre a proposé dans son DCE de réaliser la galerie à l'aide d'un tunnelier de type roche-dure-ouvert.

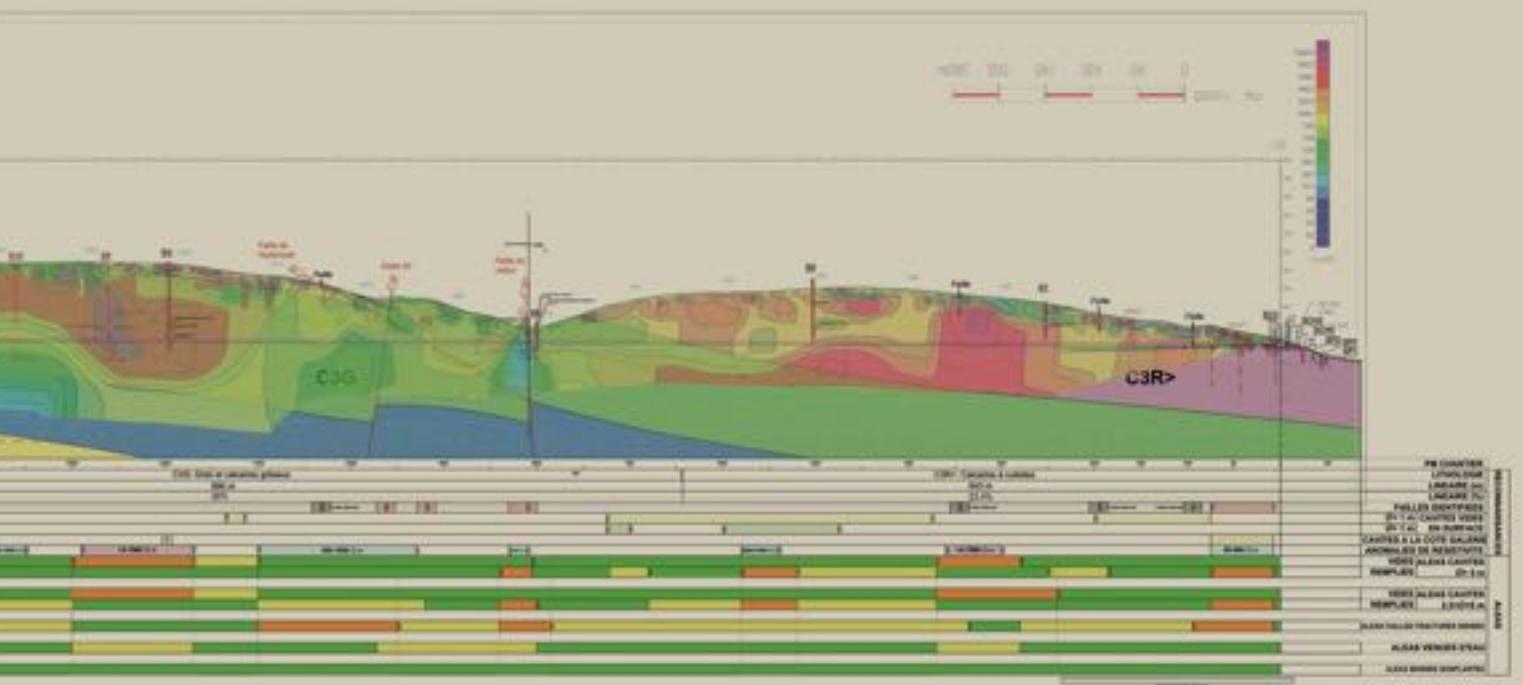
6- Plan d'Installations de chantier.

6- Site layout plan.

Les caractéristiques du tunnelier de marque Robbins (figures 8 et 9) conçu et mis en place par les équipes du chantier sont les suivantes :

- Diamètre de la roue de coupe : 3,50 m,
- Longueur totale de la machine : 135 m,

- Poids Total : 220 t,
- Molettes : 25 unités de 17",
- Poussée opérationnelle : 500 t,
- Course des vérins : 1 500 mm,
- Vitesse roue de coupe : 14 tr/min.



Le tunnelier est équipé d'une jupe télescopable et de deux *grippers* prenant appuis sur le terrain et permettant de reprendre la réaction de sa poussée de creusement.

Une casquette de protection située à l'arrière du bouclier permet aux opérateurs de mettre en place les différents types de soutènement à chaque phase de creusement de la machine.

Les profils retenus dépendent de la qualité des terrains traversés (figure 1), avec boulonnage à la demande ou mise en place de cintres UPN 140, blindage par tôles métalliques S2 entre cintres et 15 cm de béton projeté dans les cas les plus défavorables (Profil P4).

Une galerie traditionnelle de 80 m de longueur a été réalisée en méthode conventionnelle (abattage à l'explosif + fraise + brh) afin de réaliser la chambre de démarrage du tunnelier dans une zone géologique saine (figure 10).

SUIVI GÉOLOGIQUE À L'AVANCEMENT

Dans le cas particulier d'un creusement au tunnelier roche dure à *gripper*, le suivi géologique à l'avancement vise principalement à définir le soutènement à mettre en œuvre à l'arrière du bouclier et à caractériser les zones singulières en vue d'assurer le pilotage correct du tunnelier en sécurité et d'anticiper un éventuel traitement.

Il est constitué de reconnaissances directes réalisées périodiquement par la géologue du chantier (figure 11) :



7

© EIFFAGE

7- Installations de chantier tête aval.

8- Montage en usine du tunnelier.

9- Montage sur site du tunnelier.

7- Site facilities at the downstream portal.

8- Factory assembly of the TBM.

9- On-site assembly of the TBM.

levés de parois à l'arrière du bouclier avec établissement des paramètres de classification Aftes et des indices RMR de Bieniaswki et Q de Barton ; analyse du marin et des paramètres d'avancement du tunnelier.

Le choix du soutènement s'effectue sur la base d'une adéquation entre les unités géotechniques définies par les études et les conditions géologiques effectivement rencontrées, ce qui peut aboutir à des situations de ren-



8



9

© EIFFAGE



© EIFFAGE

10

10- Galerie de démarrage du TBM.

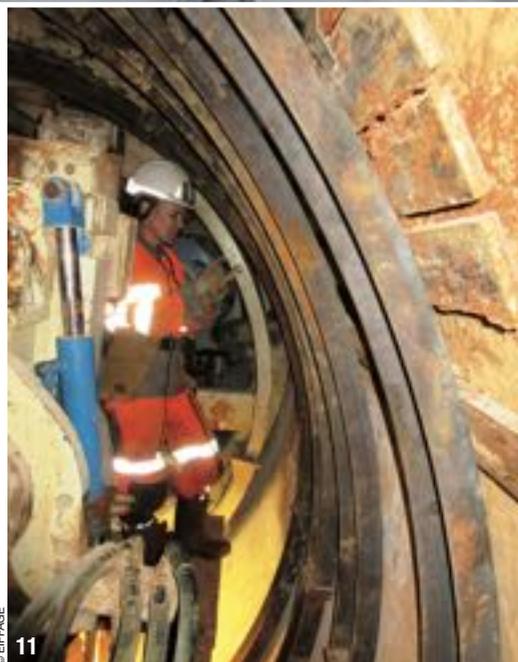
11- Levé du parement excavé - géologue.

12- Substitution de cavité argileuse.

10- TBM starting gallery.

11- Survey of the excavated face - geologist.

12- Replacement of a clayey cavity.



© EIFFAGE

11



12

forçements ou allègement des profils initialement définis dans les notes de calculs.

Des sondages destructifs de reconnaissance à l'avancement avec diagraphies instantanées viennent compléter le suivi géologique et peuvent éventuellement être complétés par des diagraphies différées. Une méthode géophysique

(BEAM) de reconnaissance indirecte de type électrique est installée sur le bouclier du tunnelier et permet une lecture continue de la résistivité et d'un paramètre quantitatif caractérisant les vides dans le terrain. Elle permet par conséquent d'évaluer le risque de rencontrer des cavités karstiques à l'avancement (sur environ 10 m).

LES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES ET LES SOLUTIONS

Entre le PM 80, correspondant au démarrage de l'excavation au tunnelier et le front actuel situé au PM 800, la galerie a traversé des formations calcaires et gréseuses très fortement karstifiées sous une couverture comprise entre 15 et 60 m, affectées par des

formes souterraines karstiques de type cavité et boyaux, tapissés de concrétions et souvent remplies de résidus argileux de décalcification.

Ces cavités, de dimension inframétrique jusqu'à décimétrique, sont caractérisées par un développement généralement subvertical et des matériaux de remplissage humides et plastiques. ▷

Au-delà des renforcements nécessaires par des soutènements mis en œuvre à l'arrière du bouclier, les cadences de creusement ont été fortement impactées par des phénomènes de colmatage des éléments de la roue de coupe (racleurs, molettes, trémie) et par la nécessité de réaliser des travaux de substitution au droit des *grippers* (figure 12).

La gestion des vides karstiques est différente puisqu'il s'agit davantage de gérer des problèmes de stabilité de paroi à court ou moyen terme, avant ou après le passage du bouclier selon la géométrie de la cavité, au moyen de coulis de consolidation ou de mousse expansive (figure 13).

Les remplissages au coulis ont été privilégiés dans les cavités affectant la zone des *grippers*, ou dans le cas d'horizons fortement décomprimés et de blocs volumineux potentiellement instables en partie supérieure de l'excavation.

La mousse expansive a trouvé son utilité pour le comblement de cavités karstiques volumineuses affectant la partie supérieure de la section, afin de stabiliser les parois des cavités karstiques et de contenir les éventuels phénomènes de vidange de matériaux de remplissage des boyaux supérieurs. Dans la plupart des cas, des blocs volumineux sont présents dans les zones karstifiées : soit le long des parois des cavités, soit individualisés dans le liant argileux.

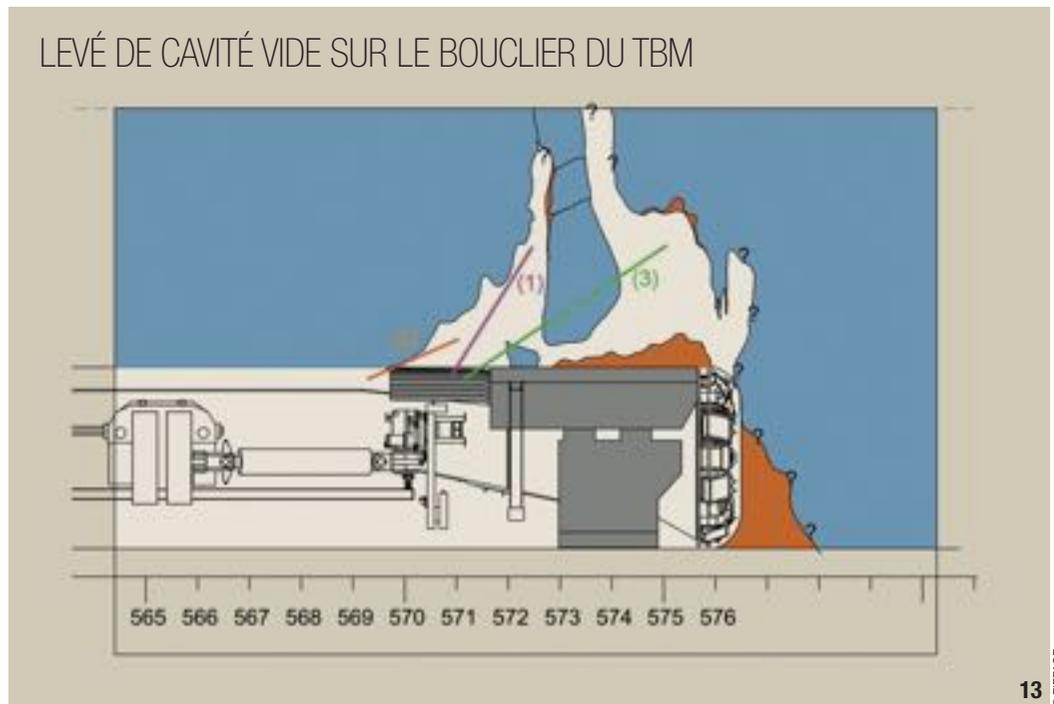
À l'avant de la roue de coupe, ces matériaux en place s'apparentent à un front mixte et sont responsables d'une trop grande sollicitation de la chambre d'abattage générant des difficultés d'évacuation, des coincements et un usure prématurée des molettes.

POINT DE VUE DU CHARGE DE LA MISSION GÉOTECHNIQUE DE SUPERVISION DU SUIVI D'EXÉCUTION (MISSION G4 - ARCADIS)

Après une phase de vérification des hypothèses géotechniques retenues par Eiffage, suite aux investigations complémentaires par sondages et campagne géophysique, ainsi que des avis sur les notes de calculs et procédures d'exécution, Arcadis, dans le cadre de sa mission de supervision du suivi géotechnique d'exécution, intervient périodiquement pendant la phase de creusement directement pour le compte du maître d'ouvrage.

Les 800 premiers mètres creusés dans les formations du C3R puis du

LEVÉ DE CAVITÉ VIDE SUR LE BOUCLIER DU TBM



13 © EIFFAGE

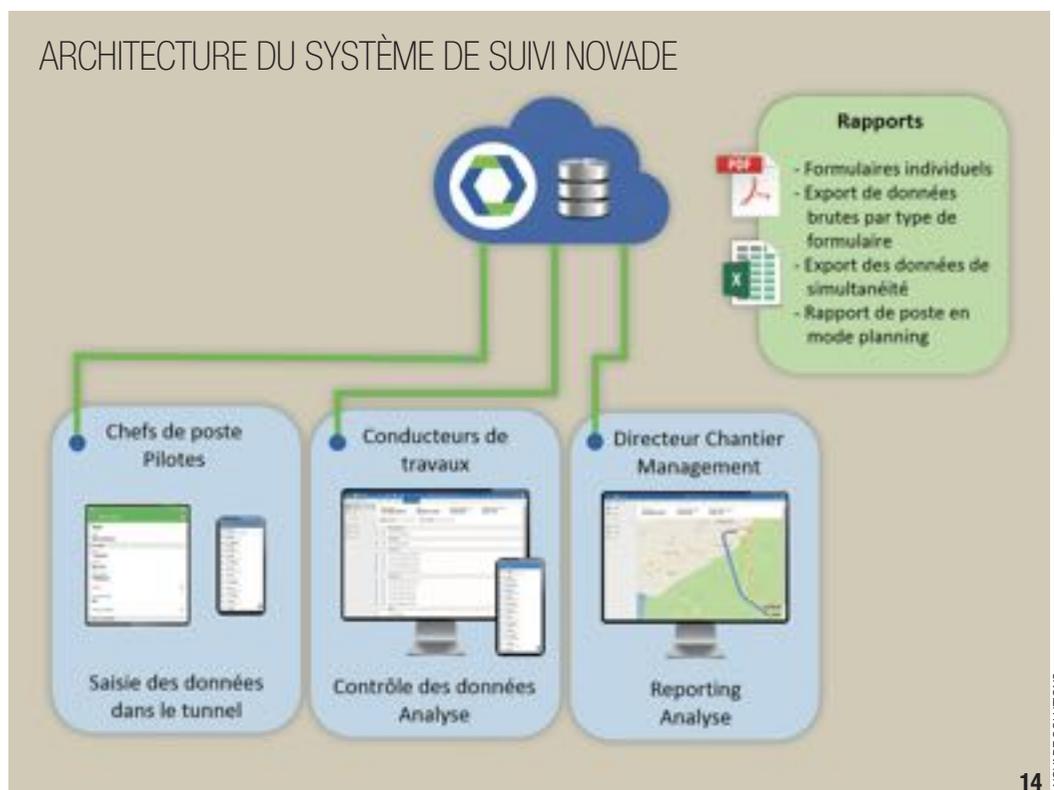
C3G ont été marqués par la traversée de nombreuses zones karstiques, de dimensions pluri-métriques remplies majoritairement d'une argile plastique, typiques des formations calcaires. La traversée de ces zones a nécessité une forte collaboration entre l'entreprise, le maître d'œuvre et Arcadis afin d'adapter, dans un premier temps, les méthodes de soutènement immédiat

13- Levé de cavité vide sur le bouclier du TBM.
14- Architecture du système de suivi Novade.

13- Survey of an empty cavity on the TBM shield.
14- Architecture of the Novade monitoring system.

proposées par Eiffage dans le cadre de sa mission G3. Ces adaptations ont permis de satisfaire à la fois les conditions de sécurité et celles de *grippage* du tunnelier. À ce jour, ces adaptations ont été satisfaisantes pour assurer l'avancement du creusement. S'en suivra, après un avancement suffisant, une validation des propositions

ARCHITECTURE DU SYSTÈME DE SUIVI NOVADE



14 © NOVADE SOLUTIONS

PRINCIPALES QUANTITÉS

CREUSEMENT PAR LA MÉTHODE CONVENTIONNELLE : 80 m
CREUSEMENT PAR TUNNELIER OUVERT, TYPE ROCHE DURE DE 3,5 m DE DIAMÈTRE EXTÉRIEUR : 2 670 m
PENTE DE LA GALERIE DES JANOTS : 0,4%
DÉBLAIS : 35 000 m³
BÉTON PROJETÉ EN GALERIE : 2 120 m³ / 22 000 m²
CINTRES HEB : 168 t
SOUTÈNEMENT EN PAROIS CLOUÉES OU BERLINOISE : 1 200 m²
BÉTON : 5 000 m³

de l'entreprise concernant les dispositions constructives à mettre en œuvre au droit de ces zones singulières, pour garantir la pérennité de l'ouvrage.

Il convient de souligner que ces zones, bien qu'identifiées sur le modèle géologique suite aux différentes investigations, puis complétées à l'avancement à

l'aide du BEAM notamment, ont généré des difficultés de creusement liées au fonctionnement de ce type de tunnelier et nécessité des échanges nombreux dans un contexte géologique rendu difficile.

LA MISE AU POINT D'UN SYSTÈME INFORMATISÉ EN TEMPS RÉEL POUR TRACER LES ÉVÈNEMENTS PAR POSTE DE TRAVAIL

Le système de suivi informatisé (figure 14), développé spécialement pour le chantier en partenariat avec la société Novade, est utilisé pour le suivi de la production et des événements en temps réel.

Ce système permet, par ailleurs, d'attacher des photographies et d'établir les

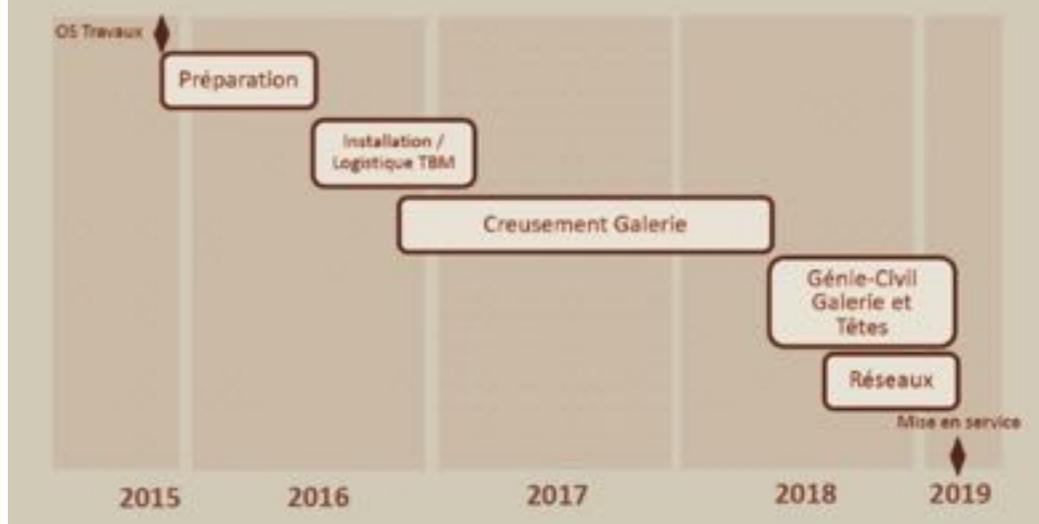
rapports de postes et fiches de suivi d'exécution.

Les opérateurs et chefs de poste sont équipés de tablettes mobiles leur permettant de décrire les événements dans l'application Novade, en fonction de leur position dans la galerie et du type d'activité.

La décomposition des catégories d'événements est pré-installée dans le logiciel, mais modifiable et améliorable en fonction du type de tâche.

Les rapports de poste, fiches de suivi d'exécution (soutènement/blindage, béton, creusement, tâches tunnelier), rapports journaliers, hebdomadaires et mensuels sont conformes aux recommandations de l'Aftes et permettent un suivi et un traitement en temps réel. □

PRINCIPALES PHASES DE RÉALISATION



PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE :
Métropole Aix Marseille Provence

MAÎTRE D'ŒUVRE :
Cabinet Merlin

MISSION GÉOTECHNIQUE G4 :
Arcadis

BUREAU DE CONTRÔLE :
Socotec

COORDONNATEUR HYGIÈNE ET SÉCURITÉ :
Bureau Véritas

ENTREPRISE PRINCIPALE :
Eiffage Génie Civil

ABSTRACT

JANOTS GALLERY - SUPPLY OF WATER FROM THE DURANCE BETWEEN THE COMMUNES OF CASSIS AND LA-CIOTAT

AURÉLIEN MARTINEZ, CABINET MERLIN - MARC DHIER SAT, EIFFAGE - PASCAL VERBAEYS, EIFFAGE - MARIE LESIMPLE, EIFFAGE - THIERRY HECK, ARCADIS

The Janots gallery project, in response to the need to supply water to the commune of La-Ciotat from the Marseille Canal, is situated in a confined location involving major environmental constraints. The ground passed through by the gallery includes numerous karstic areas, empty or filled with plastic materials. To carry out this project, it was necessary not only to design site facilities meeting the demands of the geometric and environmental context, but also to adopt methods of tunnel driving, reconnaissance as work progressed and appropriate solutions to pass through the karstic areas. The use of a modern information gathering and communication system was also able to increase the team's responsiveness, ensuring real-time handling and follow-up of the problems encountered. □

GALERÍA DES JANOTS - ABASTECIMIENTO DE AGUA DEL RÍO DURANCE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE CASSIS Y LA CIOTAT (13)

AURÉLIEN MARTINEZ, CABINET MERLIN - MARC DHIER SAT, EIFFAGE - PASCAL VERBAEYS, EIFFAGE - MARIE LESIMPLE, EIFFAGE - THIERRY HECK, ARCADIS

El proyecto de la galería des Janots, en respuesta a la necesidad de abastecimiento de agua al municipio de La Ciotat desde el canal de Marsella, se sitúa en un emplazamiento geográfico exiguo, sujeto a fuertes limitaciones medioambientales. Los terrenos que atraviesa la galería incluyen numerosas zonas cársticas vacías o llenas de materiales plásticos. La realización de este proyecto ha exigido, por una parte, el diseño de instalaciones de obra adaptadas a las exigencias del contexto geométrico y medioambiental, y, por otra, la adopción de métodos de perforación y de reconocimiento del avance y de soluciones específicas para atravesar los pasos cársticos. Por otra parte, la utilización de un avanzado sistema de obtención de datos y de comunicación ha incrementado la velocidad de reacción del equipo y ha permitido tratar y realizar el seguimiento en tiempo real de las dificultades halladas. □

TENUE AU FEU DES VOUSOIRS DE TUNNEL : IMPORTANCE ET IMPACT DE L'ÉCAILLAGE

AUTEUR : CHIQUITTA BELIGON, INGÉNIEURE EN TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS, ARCADIS

LES ESSAIS AU FEU SUR VOUSOIRS DE TUNNELS CREUSÉS AU TUNNELIER CONSISTENT À SOUMETTRE EN LABORATOIRE UN VOUSOIR TEST (CORPS D'ÉPREUVE) DU FUTUR TUNNEL À UN INCENDIE PROVOQUANT UNE MONTÉE EN TEMPÉRATURE DÉFINIE PAR LA RÉGLEMENTATION. LES RÉSULTATS DE CES ESSAIS PEUVENT S'AVÉRER DÉTERMINANTS DANS LA CONCEPTION DES VOUSOIRS : ILS PEUVENT AFFECTER LA COMPOSITION DU BÉTON, NOTAMMENT LE RECOURS À DES AJOUTS DE FIBRES POLYPROPYLENE, VOIRE CONDUIRE À LA MISE EN PLACE D'UN SYSTÈME DE PROTECTION PASSIVE.



1 © ARCADIS

SÉCURITÉ DES TUNNELS VIS-À-VIS DE L'INCENDIE RISQUE INCENDIE EN TUNNEL

La tenue au feu du revêtement d'un tunnel est un point essentiel de la sécurité vis-à-vis de l'incendie.

En effet, il est nécessaire de concevoir le tunnel afin que la vie des usagers et des personnels de secours ne puisse être mise en péril par un effondrement

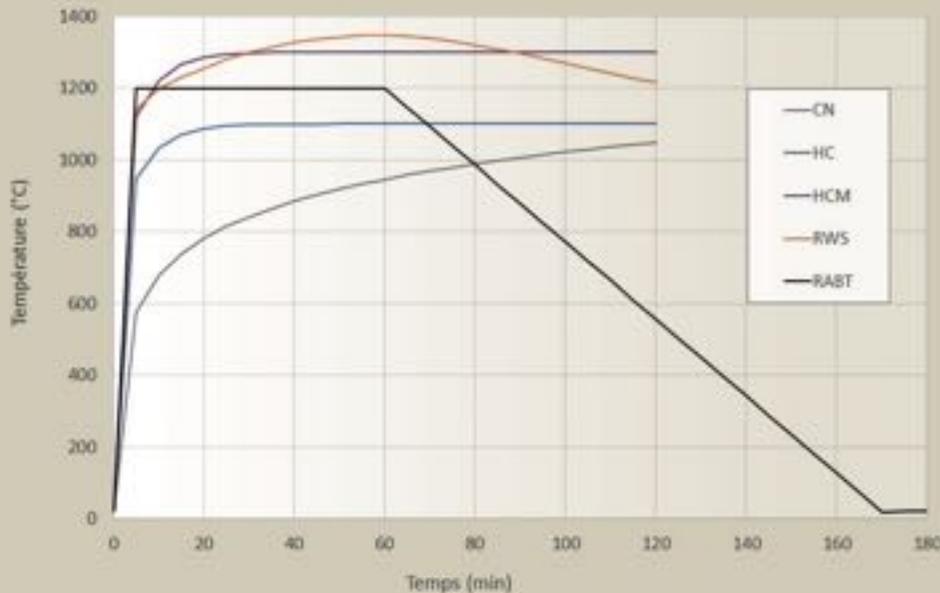
de sa structure. Dans le cas d'un tunnel revêtu de voussoirs préfabriqués posés à l'arrière d'un tunnelier, l'intégrité structurelle peut être affectée par l'écaillage. Ce phénomène se manifeste comme une perte de béton au droit de la surface exposée à l'incendie, diminuant ainsi l'épaisseur des voussoirs et leur résistance. Lorsque ces écailles tombent des voussoirs, elles perdent

1- Voussoir écaillé hors four après un essai au feu réalisé au CSTB.

1- Scaled segment outside the furnace after a fire test performed at the CSTB research centre.

également leur rôle de protection thermique vis-à-vis du béton et des aciers dont les résistances propres se dégradent avec la montée en température, impactant la résistance de la section. Sous certaines conditions, les textes réglementaires français imposent de mener des essais au feu afin de prendre en compte l'écaillage dans le dimensionnement au feu des voussoirs.

COMPARAISON DES COURBES TEMPÉRATURE-TEMPS



© CB 2

Cependant, les procédures de ces essais ne sont pas normées, laissant aux laboratoires agréés et à l'entreprise la liberté d'appliquer la démarche de leur choix.

CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE DE L'ÉCAILLAGE EN FRANCE

La réglementation définit des niveaux de résistance à atteindre et impose les courbes température-temps associées sous lesquelles la tenue au feu des structures doit être justifiée. Ces courbes couvrent les spécificités du tunnel en tant que milieu semi-confiné dans lequel circulent des matériaux plus ou moins combustibles. La figure 2 compare les courbes température-temps utilisées en France, qui obligent à prendre en compte l'écaillage dans le dimensionnement des voussoirs :

→ En tunnel routier, l'Instruction Technique annexée à la Circulaire 2000-63 (IT) impose la justification sous la courbe Hydrocarbure Majorée (HCM) pour tous les bétons lorsque le trafic est ouvert aux Transports de Marchandises Dangereuses. L'IT impose également la prise en compte de l'écaillage pour les bétons à haute performance, sous la courbe normalisée (CN ou ISO 834 dans les Eurocodes).

→ En tunnel ferroviaire, l'Instruction Technique Interministérielle n°98 300 oblige à prendre en compte l'écaillage pour tous les bétons lorsque la courbe Hydrocarbure (HC) est à appliquer.

2- Comparaison des courbes température-temps.

2- Comparison of temperature-time curves.

Pour comparaison, sont également indiquées la courbe pionnière Rijkswaterstaat (RWS) établie au Pays-Bas similaire à la courbe HCM, et la courbe allemande RABT-ZTV pour le ferroviaire issue du projet Eurêka.

L'Instruction Technique (22 novembre 2005) relative à la sécurité dans les tunnels des Systèmes de Transport Public Guidés urbains de personnes ne mentionne pas l'écaillage, le risque d'incendie d'hydrocarbures étant a priori inexistant dans ces tunnels.

PARAMÈTRES INFLUENÇANT L'ÉCAILLAGE ET MESURES DE RÉDUCTION

L'état de compression initial des voussoirs est un paramètre important dans le développement de l'écaillage.

En effet, les écailles se forment suite à l'apparition d'un pic de compression au droit de la surface exposée. Ce pic résulte :

→ Des contraintes dites thermiques, qui se développent lorsque la déformation du voussoir induite par sa chauffe est gênée par les voussoirs mitoyens et le terrain ;

→ Du chargement externe (poussée des terres, hydrostatique). Plus un voussoir est comprimé en intrados, plus l'écaillage est élevé.

Il est également à noter que le risque d'écaillage d'un béton augmente avec sa résistance en compression et diminue avec sa porosité.

L'utilisation de fibres polypropylène dans la composition du béton est une mesure de réduction d'écaillage qui permet de traiter ce dernier point.

En effet, la température de fusion de ces fibres avoisine les 160°C, ce qui permet au béton de disposer d'un réseau poral plus important qu'à froid lorsqu'un incendie se déclare.

La quantité de fibres est à optimiser par le biais d'essais d'écaillage.

Actuellement, le dosage de ces fibres s'élève à environ 2 kg/m³.

Un fort taux porterait préjudice à la fluidité du béton.

Lorsque l'utilisation de fibres n'est pas souhaitée ou ne permet pas de justifier la tenue au feu des voussoirs, les protections passives sont utilisées (plaques préfabriquées ou mortier projeté).

Ce système a pour but d'augmenter la résistance au feu par isolation thermique.

D'après la norme NF EN 13381-3, leurs performances doivent être justifiées par un essai conventionnel.

Les protections passives sont amplement utilisées pour les remises aux normes des tunnels existants.

PROGRAMME D'ESSAIS AU FEU

PROTOCOLE GÉNÉRAL D'UN ESSAI

Les essais au feu sur voussoirs n'étant pas normés, les laboratoires agréés définissent des protocoles généraux.

À titre d'exemples, on note :

→ Afin de connaître le gradient thermique à l'intérieur du voussoir, il est nécessaire d'insérer dans les coffrages, avant coulage du béton, des thermocouples positionnés en différents points du voussoir. Des thermocouples doivent également être placés dans le four afin de s'assurer que la courbe température-temps adoptée soit suivie : ils sont installés sous l'intrados du corps d'épreuve (figure 3).

→ Le corps d'épreuve doit être testé à 90 jours au moins après sa fabrication.

→ Pour qu'un essai soit interprétable vis-à-vis du projet, il faut que la réalisation du voussoir test soit représentative de la production des voussoirs du tunnel (géométrie, armatures, usine de fabrication, conditions de réalisation, composition du béton hors taux de fibres à tester, etc.).

La profondeur d'écaillage se mesure à la fin de l'essai selon une grille prédéfinie.

Les mesures ne doivent pas être effectuées près des extrémités du voussoir, car il existe des effets de bord dont on ne connaît pas la représentativité.

En complément de la profondeur d'écaillage, une analyse qualitative doit être menée : on reportera alors notamment son occurrence et son étendue. Le test peut également être filmé afin de mieux apprécier a posteriori le développement du phénomène.

Avant de le retirer du four, il est intéressant de photographier l'intrados du corps d'épreuve suite à son refroidissement pour comparer son état avant et après manutention (figure 4). En effet, la manutention peut faire tomber des écailles fragiles de béton qui ne contribuent plus à la résistance du voussoir mais qui ralentissent la propagation de la chaleur vers l'extrados. Cette opération doit être menée en s'assurant au préalable que toutes les dispositions de sécurité ont été prises.

ÉTABLISSEMENT D'UNE PROCÉDURE D'ESSAI

La procédure d'essai au feu doit porter une attention particulière au chargement initial, « à froid », du voussoir test. ▷

L'ingénieur doit définir la contrainte de compression qu'il souhaite reproduire dans celui-ci.

En général, il s'agit de reproduire la configuration de contrainte de compression la plus sévère du tracé. Dans ce cas, les conditions de chargement de l'essai sont « enveloppes » et la validation du voussoir dans cette configuration ponctuelle conduit à sa validation sur l'ensemble du tracé.

Pour reproduire cet état de contrainte, il faut appliquer au corps d'épreuve un chargement de laboratoire : soit par précontrainte (chargement interne) soit par bâti (chargement externe). Puisque les phénomènes induisant l'écaillage sont concentrés à l'intrados du voussoir, l'ingénieur peut définir la contrainte de compression à atteindre uniquement dans cette zone. Dans ce cas, il doit s'assurer que le chargement à appliquer n'introduit aucune traction en tout autre point pour ne pas fragiliser le voussoir.

Dans le cas d'un essai sur voussoir précontraint, les gaines de précontrainte sont à placer avant coulage du béton. Les voussoirs ne sont donc pas identiques à ceux posés dans le tunnel. Il est important de mesurer la température de la gaine par des thermocouples placés à proximité pour estimer l'influence de celle-ci sur le gradient thermique.

Les zones d'analyse doivent être situées loin des ancrages car ceux-ci perturbent plus grandement le champ de température ainsi que l'état d'écaillage.

Dans le cas d'un chargement extérieur, un bâti de chargement composé de vérins verticaux et horizontaux est à concevoir.

Le dimensionnement du chargement reproduisant l'état initial définit la force transmise par les vérins et l'excentrement des vérins horizontaux. La phase de chargement à froid s'effectue par étapes, pendant lesquelles aucune traction n'est admise.

L'avantage de ce chargement réside dans son caractère non intrusif et sur la possibilité d'agir sur la charge appliquée tout au long de l'essai, contrairement à la précontrainte qui ne dépend que de la valeur appliquée à froid en début d'essai.

Le bâti de chargement permet de tester des assemblages de voussoirs.

À noter qu'il existe des essais au feu sur voussoirs non chargés qui ne font pas l'unanimité auprès des spécialistes car ils s'affranchissent d'un état initial de contraintes.



© ARCADIS

À ces spécificités de chargement s'ajoutent les conditions de déformation prescrites au corps d'épreuve lors de l'essai : déformation libre (figure 5-a), blocage partiel (figure 5-b), ou total (figure 5-c). La procédure d'essai doit permettre de s'approcher au mieux du comportement cinématique d'un voussoir dont la déformation est gênée par la présence des autres voussoirs de l'anneau, des anneaux mitoyens, et du terrain encaissant.

En laboratoire, ces conditions sont reproduites en plaçant le voussoir à l'intérieur d'un cadre horizontal rigide, généralement en béton mixte, ou, dans le cas d'un chargement externe, en pilotant les vérins en déplacement.

Les voussoirs précontraints sont en général simplement posés sur les parois du four. L'utilisation d'un cadre bloquant les déplacements horizontaux du voussoir est gênée par la présence des ancrages des gaines à ses extrémités. Le choix des conditions de chargement et de déformation est fortement influencé par les moyens du laboratoire. Par exemple, le bâti de chargement doit être adapté à la géométrie du corps d'épreuve, et les vérins doivent être capables de transférer les efforts adéquats, sans poinçonner le voussoir.

3- Vue de l'intrados d'un corps d'épreuve (voussoir) avant essai installé sur un four du CSTB.

3- View of the intrados of a test specimen (segment) before testing, set up on a CSTB furnace.

ÉTABLISSEMENT D'UN PROGRAMME D'ESSAIS AU FEU

Le maître d'ouvrage, assisté par son maître d'œuvre, définit les objectifs de tenue au feu du tunnel. L'entreprise et le laboratoire agréé établissent un programme d'essais au feu permettant d'y répondre. Un programme est une arborescence binaire d'essais, basée sur des critères de validité définis en amont (température maximale dans le voussoir après X minutes d'essai, profondeur d'écaillage caractéristique inférieure à Y mm, etc.). La figure 6 présente un programme théorique d'essais permettant de valider et d'optimiser le taux de renforcement

du béton en fibres polypropylène, et statuer sur l'utilisation de protections passives. Dans ce programme, seul le taux de fibres est testé, les autres paramètres (chargement du voussoir, composition du béton hors fibres etc.) sont constants. Il est conseillé de doubler un essai afin de confirmer ou non sa validité. Cependant, il convient d'insister sur la non reproductibilité des essais.

IMPACTS DES ESSAIS SUR LE PROJET

IMPACT SUR LE PLANNING

Le planning peut être fortement impacté par la stratégie du maître d'ouvrage vis-à-vis du traitement de la tenue au feu du tunnel.

Dans le cas où la protection thermique est choisie dès le début de la conception, le planning devra intégrer le choix du type de protection (plaques préfabriquées ou mortier projeté), ainsi que les essais conventionnels sur échantillon, avec pose et système de fixation similaires à ce qu'il sera mis en œuvre en tunnel. Les phases de réalisation du tunnel devront prendre en compte les ateliers de mise en place de ces protections, suite à la pose des voussoirs par le tunnelier.

Si le maître d'ouvrage opte pour le choix d'une composition de béton résistant à l'écaillage, le planning sera davantage impacté lors des études mais pas lors de la réalisation du tunnel. Pour déterminer le moment et le temps à consacrer au dimensionnement des voussoirs au feu, il faut intégrer le choix du laboratoire agréé, l'établissement du programme d'essais, le conditionnement des corps d'épreuve (90 jours), la mise en place des essais, leur exécution et l'analyse des résultats. Les essais au feu doivent donc être engagés dès lors que la conception « à froid » des voussoirs est aboutie, que leur usine de fabrication est fonctionnelle, que le laboratoire agréé est choisi, et que le programme d'essais au feu est arrêté. Le laboratoire doit instrumenter les coffrages des corps d'épreuve avant coulage.

De manière idéale, la totalité des essais du programme est menée afin d'optimiser la composition du béton par rapport à son coût de production. Cependant, lorsqu'il existe une forte contrainte de temps (fort retard dans l'exécution des essais au feu), on ne cherchera pas à optimiser la formulation mais à tronquer le programme dès le premier essai au feu généralement mené sur une composition à dosage « type » en fibres polypropylène (2 kg/m³).



© CSTB
4

Dans le cas où l'écaillage mesuré est trop important, des protections passives devront être mises en place. Le choix final de la composition du béton et de l'utilisation éventuelle de protection passive revient au maître d'ouvrage, sur la base de l'analyse des essais au feu.

IMPACT SUR LE COÛT DES DIFFÉRENTS CHOIX TECHNIQUES

La stratégie relative à la tenue au feu des voussoirs prend également en compte le coût des solutions étudiées, qui impacte les phases de conception, de réalisation mais aussi d'exploitation. Sous exploitation courante, la maintenance des structures est plus aisée sans protection thermique. En effet, dans le cas où des défauts dans les voussoirs apparaissent, ceux-ci sont masqués par les protections.

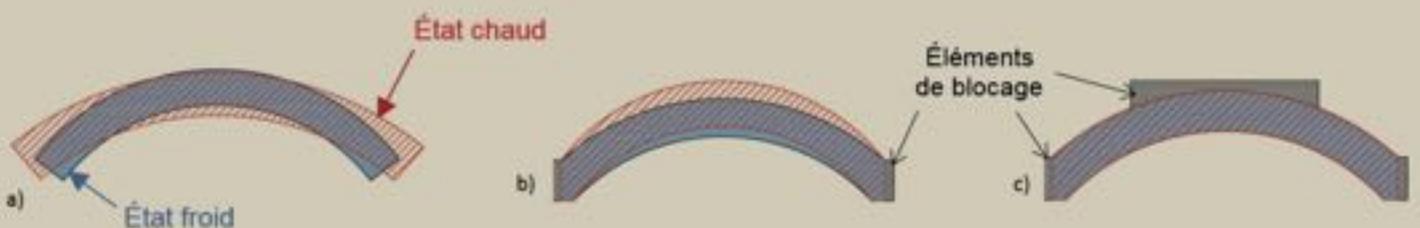
4- Photographie de l'intrados du même corps d'épreuve à la fin d'un essai au feu et avant manutention.
5- Différentes conditions de déformation du corps d'épreuve.

4- Photograph of the intrados of the same test specimen at the end of a fire test and before handling.
5- Various conditions of deformation of the test specimen.

Les protections par plaques nécessitent davantage d'entretien car elles sont plus rapidement affectées par les gaz émis en tunnel. Néanmoins, suite à un incendie, le béton des voussoirs protégés par protections passives sera moins endommagé, entraînant des réparations moins onéreuses que pour des voussoirs non protégés. En termes de matériaux, doivent être comparés le coût d'une protection thermique (par plaques ou par mortier) appliquée à l'ensemble du tunnel et le surcoût apporté par la composition spécifique du béton. Une étude du Cetu remarque qu'en général le surcoût d'un béton fibré est nettement inférieur à celui des protections passives. Cependant, le choix d'un béton fibré implique également le coût lié aux essais au feu et à leur interprétation. Le coût d'un essai dépend du choix

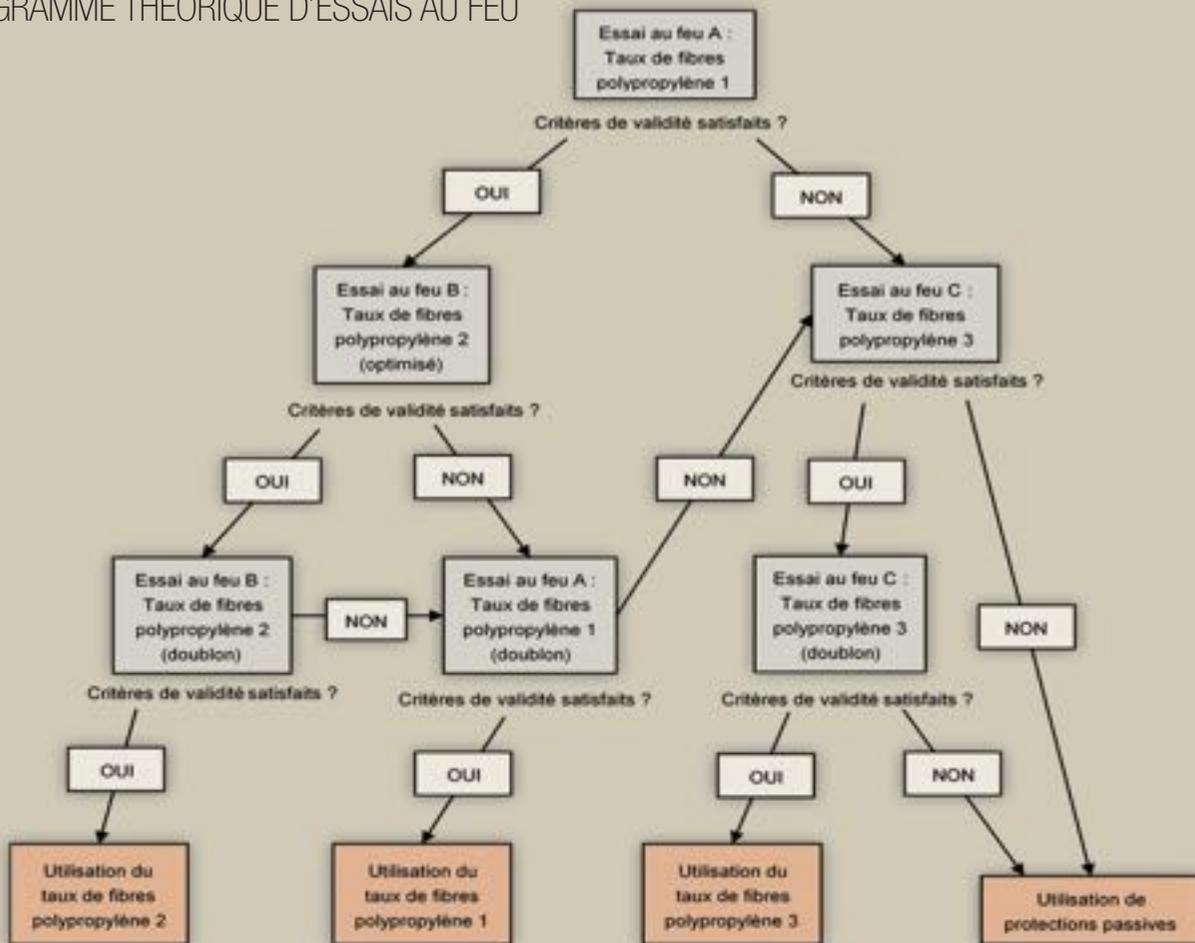
de la procédure adoptée. C'est pour cette raison que l'entreprise et le laboratoire doivent l'établir conjointement, car la procédure fait appel au savoir-faire de chacun et au matériel dont dispose le laboratoire. Un essai sans chargement du corps d'épreuve et libre de déformation est le moins onéreux mais n'est pas représentatif. L'ajout de gaines précontraintes est moins coûteux que le dimensionnement d'un bâti de chargement, notamment lorsque les charges à appliquer sont importantes. Cependant, les gaines étant intrusives, les corps d'épreuve testés ne sont pas identiques aux voussoirs qui seront réellement posés en tunnel. De plus, les recherches tendent à montrer que sous sollicitation thermique, un voussoir chargé par bâti présente le comportement le plus similaire à celui d'un voussoir en conditions *in situ*. ▷

DIFFÉRENTES CONDITIONS DE DÉFORMATION DU CORPS D'ÉPREUVE



5
© CB

PROGRAMME THÉORIQUE D'ESSAIS AU FEU



Si le délai accordé aux essais au feu est très court, et si le retard pour leur réalisation est important, le coût à terminaison du tunnel peut être gravement affecté. En effet, dans le cas où la composition d'un béton n'est pas validée par des essais réalisés tardivement pendant le creusement du tunnel, il est nécessaire d'avoir recours à des protections passives pour l'ensemble du tracé, car il est difficile, voire impos-

sible, de modifier et valider la nouvelle formulation lorsque l'usine de voussoirs est déjà en exploitation. Les essais au feu sont donc déterminants pour un projet. Chaque étape menant à ces essais doit faire l'objet d'une concertation entre les différents acteurs afin d'optimiser la conception de tenue au feu des voussoirs. Sans parution de texte normatif ou de recommandation, seuls les retours

d'expérience peuvent orienter ce travail. Actuellement, le comité technique 256-SPF du Rilem travaille sur l'amélioration des connaissances du phénomène d'écaillage afin de publier des recommandations concernant, entre autres, les procédures d'essais au feu sur voussoir. Ces procédures permettront d'affiner l'analyse multicritère à mener lors de l'établissement d'un programme d'essais. □

6- Programme théorique d'essais au feu.

6- Theoretical fire test programme.

ABSTRACT

FIRE RESISTANCE OF TUNNEL SEGMENTS: IMPORTANCE AND IMPACT OF SCALING

CHIQUITTA BELIGON, ARCADIS

The fire resistance of tunnels lined with prefabricated concrete segments should, in the most severe conditions, be substantiated by means of fire tests. The results of these tests are decisive for the design of the segments and fire protection systems: they can validate the concrete mix design, in particular the use and dosage of polypropylene fibres, or require the installation of a passive protection system. This decision is closely related to project cost control. Optimisation of the concrete mix design impacts the costs involved in post-fire testing and repairs, while the installation of a passive protection system affects the cost of construction and the complexity of maintenance. □

RESISTENCIA AL FUEGO DE LAS DOVELAS DE TÚNEL: IMPORTANCIA E IMPACTO DEL DESCASCARILLADO

CHIQUITTA BELIGON, ARCADIS

La resistencia al fuego de los túneles revestidos de dovelas prefabricadas de hormigón debe comprobarse en las condiciones más extremas mediante ensayos de incendio. Los resultados de estas pruebas son determinantes para el diseño de las dovelas y las protecciones contra incendios: permiten validar la composición del hormigón, en especial el uso y la dosificación de fibras de polipropileno, o imponer la instalación de un sistema de protección pasiva. Esta decisión está estrechamente relacionada con el control del coste del proyecto. La optimización de la composición del hormigón afecta a los costes vinculados con las pruebas y las reparaciones post incendio, mientras que la instalación de un sistema de protección pasiva repercute en el coste de construcción y en la complejidad del mantenimiento. □



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

SANTÉ
PRÉVOYANCE
RETRAITE
ÉPARGNE
ASSURANCES
ACTION SOCIALE
VACANCES

PRO BTP
GROUPE



© GEOS

LIGNE 11 DE LA RATP AUX LILAS - PUITS ET GALERIE D'ESSAIS GÉOTECHNIQUES CALMETTE

AUTEURS : STÉPHANE CURTIL, DIRECTEUR, GEOS - BENEDIKT STÜTZL, INGÉNIEUR, GEOS - CÉLIA WOLFF, INGÉNIEUR, GEOS - CAMILLE GEORGE, CHEF DE PROJET, RATP MOP/PL11

LA CONSTRUCTION ANTICIPÉE DE L'OUVRAGE ANNEXE CALMETTE AVAIT COMME OBJECTIF L'ÉTUDE DE L'EFFICACITÉ DE LA TECHNIQUE DE JET GROUTING DANS LES ARGILES PLASTIQUES ET LE CALAGE DES PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES DES SOLS À L'AIDE D'UNE MODÉLISATION AUX ÉLÉMENTS FINIS 3D, AJUSTÉE SUR LES DÉFORMATIONS DES TERRAINS ET DE L'OUVRAGE, DE MANIÈRE À OPTIMISER ENSUITE LES DIMENSIONNEMENTS DES OUVRAGES PRINCIPAUX DU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 11.

CONTEXTE DU PROJET

Le projet du puits et de la galerie d'essais géotechniques Calmette s'inscrit dans le projet de prolongement de la Ligne 11 du métro de Paris. Étant les premiers ouvrages définitifs construits pour le prolongement de la Ligne 11, ils ont une triple fonction :

- 1- Avant le chantier principal, ils permettent de réaliser une série d'essais géotechniques *in situ* dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin ;
- 2- Pendant le chantier principal, ils servent d'ouvrage d'accès ;
- 3- En service, ils servent d'ouvrage de ventilation du tunnel.

Le projet se situe sur le plateau de Romainville (93), au nord de l'anticlinal

du même nom. Le secteur est structuré par deux buttes où le Calcaire de Brie (voire les Marnes à Huîtres) affleure, séparées par un talweg creusé dans les Argiles Vertes. Le puits traverse en partie supérieure, les Limons des Plateaux et le Calcaire de Brie, puis les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin, dans lesquelles la galerie est creusée (figure 2).

DESCRIPTION DES OUVRAGES ET DE LA MÉTHODE DE CONSTRUCTION

Le puits, d'un diamètre de 9 m et d'une profondeur de 18 m, ainsi que la galerie, d'un diamètre de 7 m et d'une longueur de 17 m, ont été réalisés en méthode conventionnelle (figures 3

1- Vue en plan du puits Calmette - Essais géotechniques en cours.

1- Plan view of the Calmette shaft - Geotechnical tests in progress.

et 4). La galerie a été creusée par demi-section. Pour sécuriser le terrassement de la demi-section supérieure (figure 5), une voûte divergente a été mise en œuvre par *forepolling* et le front de taille a été renforcé de boulons en fibre de verre.

Les longueurs des passes de terrassement ont varié entre 80 cm et 1 m. Après le terrassement de la demi-section supérieure, les travaux ont été arrêtés pendant un mois, de manière à suivre l'évolution dans le temps des déformations des ouvrages et des terrains.

Avant le terrassement de la demi-section inférieure, le revêtement en béton armé de la demi-section supérieure a été mis en place, supporté par des micropieux destinés à reprendre les charges pendant l'excavation du stross et à limiter ainsi les tassements en surface.

Le revêtement définitif a été dimensionné pour résister aux pressions de gonflement dans les Argiles Vertes.

PLOT D'ESSAIS GÉOTECHNIQUE

Pour analyser la performance du jet grouting dans les Argiles Vertes (argiles plastiques) et les Marnes de Pantin, un plot d'essai comprenant 6 colonnes a été réalisé par Keller Fondations Spéciales dans l'emprise du futur puits. L'objectif était de tester, *in situ*, les différentes techniques de jet grouting : 3 colonnes ont donc été réalisées en jet double (coulis enrobé d'air) avec pré-découpage au préalable (à l'eau et l'air) et les 3 autres colonnes ont été réalisées en jet triple, tous en faisant varier les paramètres de jet (pression et vitesses de rotation/remontée). L'objectif visé pour le diamètre des colonnes était de 1 m.

Une série d'essais en laboratoire et *in situ* a permis de caractériser la résistance à la compression et les modules de déformations des colonnes de jet grouting. Pour cela, il a été réalisé :

→ Des sondages carottés avec prélèvement d'échantillons intacts pour essais en compression simple en laboratoire ;

→ Des essais dilatométriques dans les sondages carottés verticaux.

Lors du terrassement du puits, seules les colonnes effectuées en jet double se sont révélées être présentes sur toute la hauteur attendue (jusqu'au fond du puits). Elles ont été observées en continu, avec des diamètres équivalents variant de 0,9 m à 1,5 m dans les Argiles Vertes, et en moyenne un diamètre de 1,0 m à 1,2 m pour un objectif de 1 m. À l'emplacement des colonnes réalisées en jet triple en revanche, il n'a été observé que des blocs de faibles diamètres (moins de 20 cm pour la majorité), de manière discontinue, à différentes profondeurs.

2- Vue en coupe du puits et de la galerie Calmette.

2- Cross-section view of the Calmette shaft and gallery.

La technique du jet triple s'est donc révélée bien moins efficace que la technique de jet double pour la mise en œuvre de colonnes de jet grouting dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin.

Lors du carottage dans les colonnes (figure 6) ainsi que pendant le terrassement (figure 7), il a été observé que les colonnes étaient constituées de coulis avec quelques inclusions d'Argiles Vertes.

Les colonnes réalisées dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin correspondent donc plus à une substitution des sols en place par du coulis de ciment qu'à un mélange de sol en place avec du coulis de ciment. Le pré-découpage dans ces terrains réputés non injectables est indispensable afin d'obtenir cette substitution quasi-intégrale du volume de sol. Le fait que l'argile soit presque intégralement remplacée par du coulis dans les colonnes conduit à une importante amélioration des caractéristiques mécaniques globales, avec toutefois une forte dispersion (résistance en compression

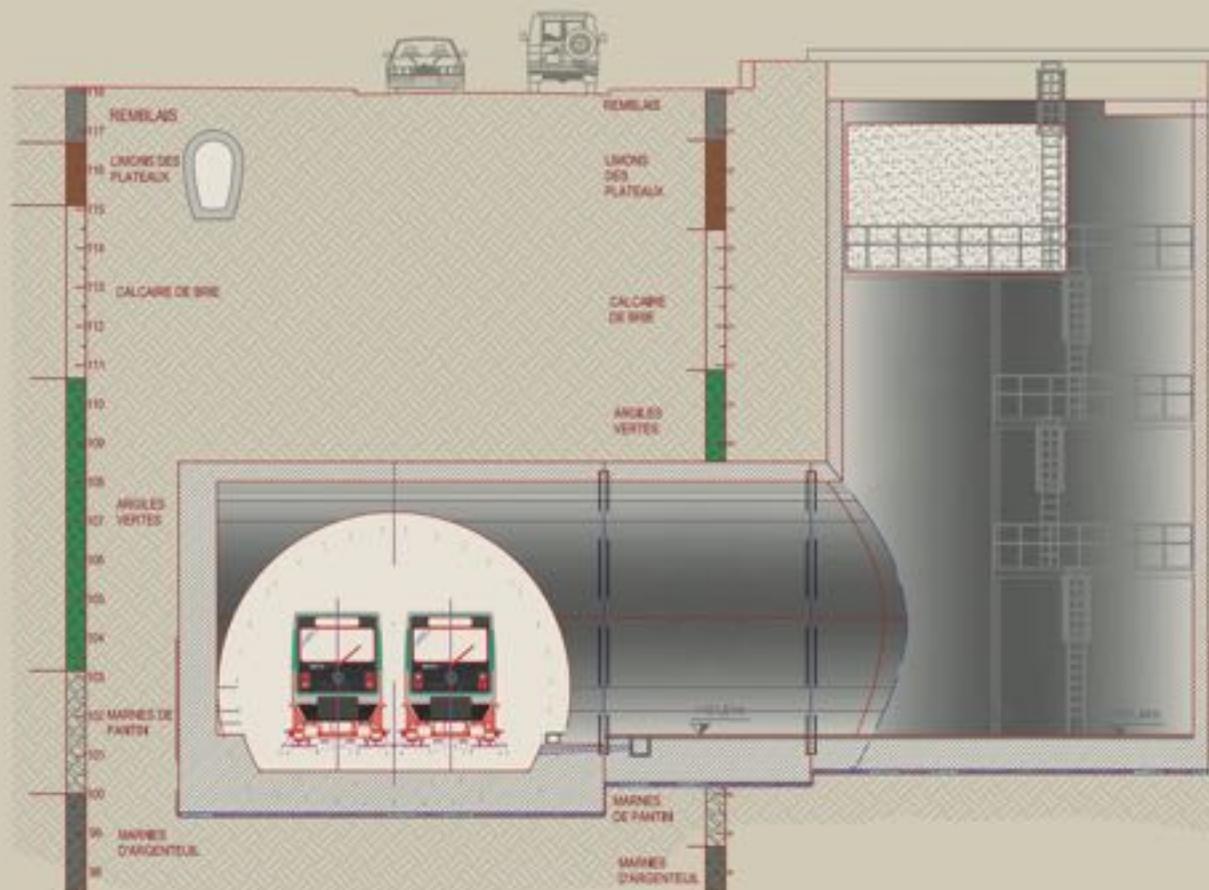
uniaxiale de 5 MPa en moyenne dans les colonnes dans les Argiles Vertes et de 11 MPa dans les colonnes dans les Marnes de Pantin).

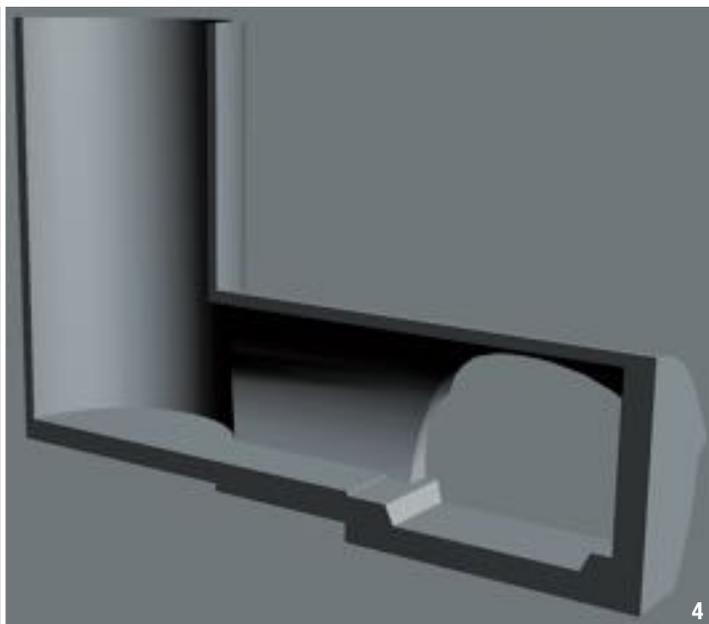
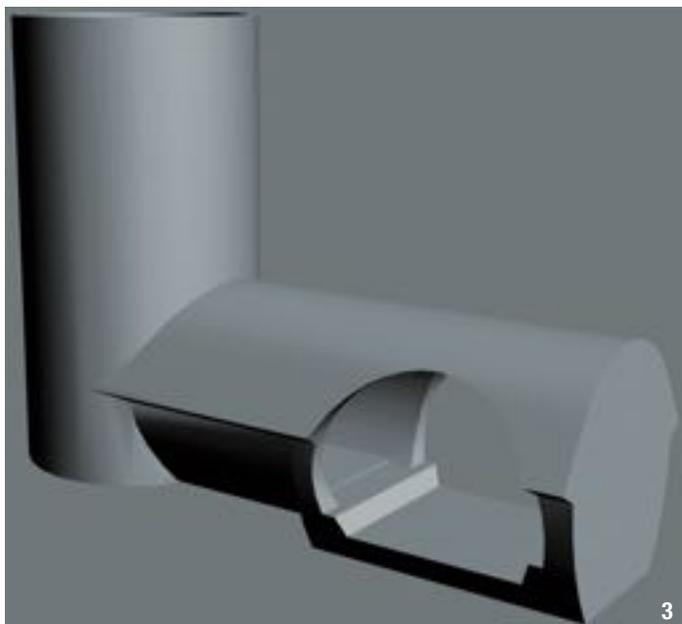
AUSCULTATION MOYENS D'AUSCULTATION

Pour suivre les déformations du terrain, du puits et de la galerie, un dispositif d'auscultation géotechnique et topographique exhaustif a été mis en place. Il comprend :

- Un théodolite automatique accompagné de 73 cibles de haute précision au sol et sur des bâtiments avoisinants ;
- 4 forages équipés avec des extensomètres, 4 forages équipés avec des inclinomètres et 2 forages équipés simultanément en inclinomètres et en extensomètres ;
- 1 extrusomètre implanté dans l'axe de la galerie ;
- 3 profils de convergence en puits avec un suivi manuel et 4 profils de convergence dans la demi-section supérieure avec un suivi automatique en continu ;

VUE EN COUPE DU Puits ET DE LA GALERIE CALMETTE





→ 2 sections de soutènement de la galerie équipées en jauges de contraintes.

Pendant le terrassement du puits et de la galerie Calmette, les différents dispositifs d'auscultation ont enregistré les déformations du terrain et des ouvrages qui ont été liées en grande partie aux travaux en cours, mais aussi aux effets différés des travaux précédents : réalisation des colonnes de jet, du boulonnage de front et de la voûte parapluie. En effet, la réalisation des colonnes de jet grouting et de la voûte parapluie dans des terrains à très faible perméabilité a provoqué des soulèvements importants du terrain allant jusqu'à 35 mm juste après la fin de la réalisation des colonnes de jet grouting et jusqu'à 25 mm après la fin de la réalisation de la voûte parapluie et du renforcement du front de taille.

ÉVOLUTION DES DÉFORMATIONS EN SURFACE LORS DU TERRASSEMENT DE LA DEMI-SECTION SUPÉRIEURE

Le théodolite automatique a permis de suivre en continu l'évolution des tassements pendant le terrassement du puits et le creusement de la galerie, puis pendant le mois d'auscultation sans travaux. Ainsi, il a été possible d'analyser l'évolution de la cuvette des tassements au niveau de 4 lignes de mesures en surface (lignes rouges 1 à 4 de haut en bas dans la figure 9), perpendiculaires à l'axe de la galerie. La figure 9 montre les isovaleurs de tassements pour les passes de terrassement n°05 (en haute à gauche) et n°14 (à droite), en fin de terrassement

de la galerie (en bas à gauche) et à la fin du mois d'auscultation (en bas à droite). La galerie est figurée par le rectangle noir de taille croissante. L'analyse des tassements tout au long du creusement de la demi-section supérieure de la galerie et du mois d'auscultation permet de constater que :

- Quand le front de taille se situe au droit de la coupe considérée, les tassements en surface atteignent une valeur variant entre 6 et 19 mm dans l'axe de la galerie ;
- Pour les deux lignes de mesure proches du puits, le frottement des terrains sur le soutènement du puits réduit significativement les tassements en surface ;
- À la fin de la période d'auscultation, les tassements en surface varient entre 6 et 19 mm au bord de l'emprise de la galerie et entre 25 et 30 mm dans l'axe de la galerie (figure 9).



3- Vue 3D des ouvrages avec l'intersection du futur tunnel de la Ligne 11.

4- Coupe 3D des ouvrages avec l'intersection du futur tunnel de la Ligne 11.

5- Front de la demi-section supérieure de la galerie.

3- 3D view of the structures with intersection of the future tunnel on Line 11.

4- 3D section of the structures with intersection of the future tunnel on Line 11.

5- Front of the upper half section of the gallery.

COHÉRENCE DES MESURES ET COMPORTEMENT GLOBAL DES OUVRAGES

L'examen global des données d'auscultation permet de mettre en lumière plusieurs particularités du comportement de l'ouvrage :

- Les tassements observés sont importants et atteignent une amplitude maximale de 30 mm environ lors de l'excavation de la demi-section supérieure de la galerie (figure 9) ;
- Les extensomètres montrent de manière nette un tassement des terrains situés latéralement aux piédroits de la galerie entre 6 et 14 m de profondeur et un comportement de tassement monolithique des terrains situés au-dessus de la galerie ;
- Les tassements en surface déterminés à l'aide des extensomètres (points fixes en profondeur sous la galerie) et les tassements mesurés au niveau des points topographiques sont cohérents ;
- L'extrusion du front de taille mesurée reste faible avec en moyenne 1 à 2 mm entre chaque passe de terrassement, soit un volume total d'extrusion du front sur le linéaire d'excavation correspondant à une avancée totale cumulée des terrains du front d'environ 1,8 cm à 3,6 cm (pour 18 passes de terrassement) ;
- Les déformations mesurées sur les cintres sont très faibles (1 à 2 mm de convergence des cintres et 5 à 6 mm de tassement d'ensemble) et sont apparues de manière différée par rapport à la pose des cintres (5 à 10 jours).



6 © GEOS

RÉTRO-ANALYSE DE CALAGE DES PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES À L'AIDE D'UNE MODÉLISATION AUX ÉLÉMENTS FINIS 3D

Les modélisations aux éléments finis 3D (figure 8), de type rétro-analyse de calage des paramètres géotechniques, ont permis de déterminer des paramètres géotechniques de sols à partir du comportement de l'ouvrage réel, mais également de valider l'efficacité de la voûte parapluie et du boulonnage du front par clous en fibre de verre. Elles ont été réalisées au moyen du logiciel Z-Soil.

Les paramètres géo-mécaniques des terrains ajustés au moyen de la modélisation intègrent à la fois le comportement des sols et les effets spécifiques liés aux méthodes d'excavation et de soutènement de l'ouvrage. La rétro-analyse consiste ici à caler le modèle numérique 3D sur les données d'auscultation en faisant varier différents paramètres.

MODÉLISATIONS DES SOLS ET DES OUVRAGES

Les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin ont été modélisées à l'aide d'une loi de comportement HSM.

Le soutènement du puits et de la galerie ont été modélisés de deux manières distinctes :

→ **Puits** : il a été modélisé à l'aide d'éléments « coque » (*shell*) avec les caractéristiques d'une section mixte déduites des caractéristiques des cintres et du béton projeté.

→ **Galerie** : les cintres ont été modélisés comme élément « poutre » (*beam*) avec les caractéristiques géométriques de la section et le module d'Young de l'acier, et le béton projeté comme élément « coque » (*shell*) intégrant son épaisseur et son module d'Young (figure 10).

6- Exemple de carotte extraite de l'une des 3 colonnes réalisées en jet double.

7- Déblaiement des colonnes de jet (jet double) lors du terrassement du puits.

6- Example of a core sample extracted from one of the 3 columns executed in double jet.

7- Clearing of jet grouting columns (double jet) during shaft earthworks.



7 © GEOS

DIMENSIONNEMENT DE L'OUVRAGE ET ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Le calcul initial de dimensionnement de l'ouvrage (étude d'exécution) et l'étude de sensibilité ont donné des prévisions de tassements en surface très inférieures à ceux qui ont été observés au cours du chantier et de la phase d'auscultation de 1 mois après travaux.

La rétro-analyse de calage géotechnique des paramètres géo-mécaniques montre que les simulations menées en dégradant seulement les paramètres de sol ne permettent pas de recalculer le modèle numérique 3D sur les observations de terrain (extrusion du front, tassement en surface, déformation des piédroits).

En effet, pour obtenir la concordance entre les tassements numériques et ceux mesurés sur site en ne faisant varier que les paramètres mécaniques des sols, il est nécessaire de dégrader ces paramètres bien en deçà des plages de valeurs réalistes. D'autres pistes d'analyse ont alors été poursuivies pour faire converger le modèle numérique vers les déformations mesurées *in situ*. Il a été notamment retenu une activation du soutènement décalée de 2, 3, 4 et 5 passes à l'arrière du front de taille, permettant ainsi un déconfinement plus important des terrains avant la mobilisation du soutènement.

RÉTRO-ANALYSE DE CALAGE DES PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES

Les différentes analyses paramétriques conduites ont montré que seules des simulations dans lesquelles la mise en place du soutènement de la galerie a été retardée, autorisant ainsi une plus grande convergence des terrains, permettent de retrouver des tassements en surface similaires à ceux mesurés. Le paramètre déterminant l'amplitude des tassements induits en surface par l'excavation de la demi-section supérieure d'une galerie, à faible profondeur dans les Argiles Vertes, est la décompression et donc la déformation des terrains avant mise en place du soutènement.

La modélisation avec une activation du soutènement 2 à 5 passes après l'excavation est ainsi une façon pertinente d'aborder la rétro-analyse sur cet ouvrage.

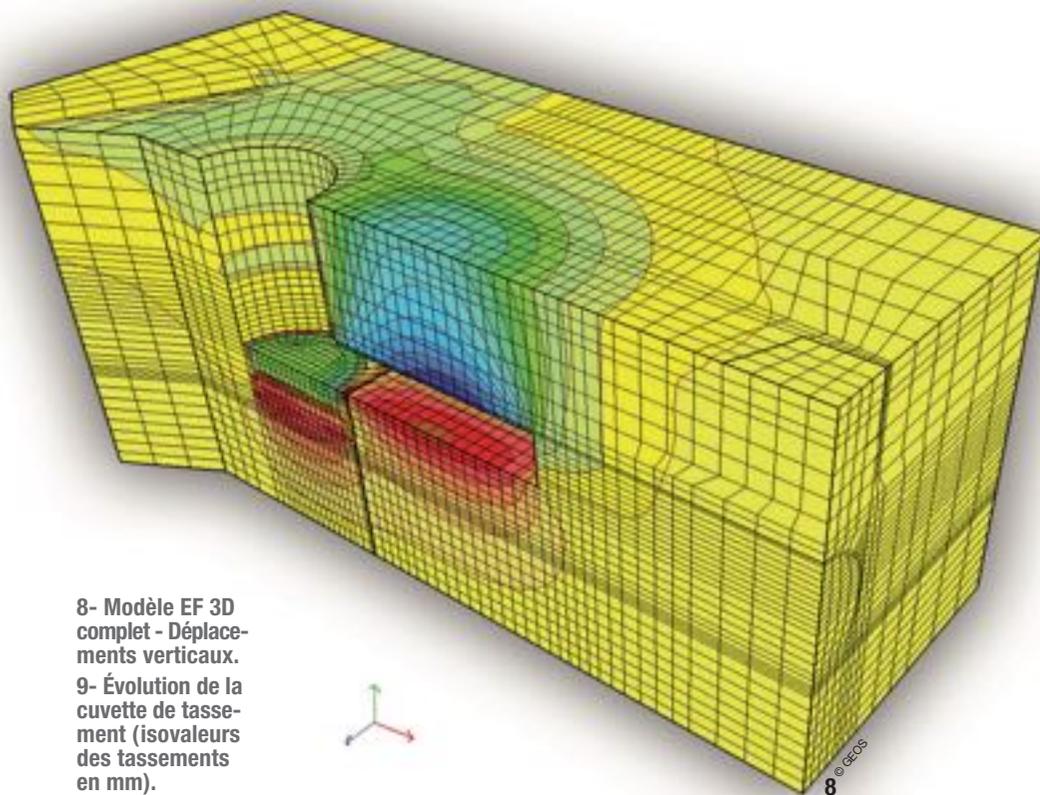
Les calculs de rétro-analyse ont également été l'occasion de comparer deux méthodes de modélisation du renforcement du front de taille par clouage avec des boulons en fibre de verre. L'effet du boulonnage du front a été modélisé en simulant le renforcement soit par un milieu équivalent, soit par modélisation unitaire des boulons (figure 11).

Les résultats montrent que, dans notre cas d'étude, le matériau équivalent pour le renforcement du front de taille est une façon adéquate, pertinente et rapide de modélisation qui permet d'obtenir des résultats très similaires (2 à 4% d'écart sur les tassements calculés en surface) à ceux d'une modélisation unitaire des boulons de renforcement.

CONCLUSION

Les travaux, auscultations et modélisations mis en œuvre sur l'ouvrage annexe Calmette, dans le cadre du projet de prolongement de la Ligne 11 de la RATP, ont apporté de nombreux éléments techniques de compréhension du comportement des sols et des ouvrages géotechniques lors du creusement d'un puits et d'une galerie dans des matériaux argileux raides et marneux.

Concernant le renforcement des argiles par jet grouting, la technique du jet double avec pré-découpage dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin a permis d'obtenir localement une importante amélioration des caractéristiques mécaniques par substitution quasi intégrale des sols par du coulis



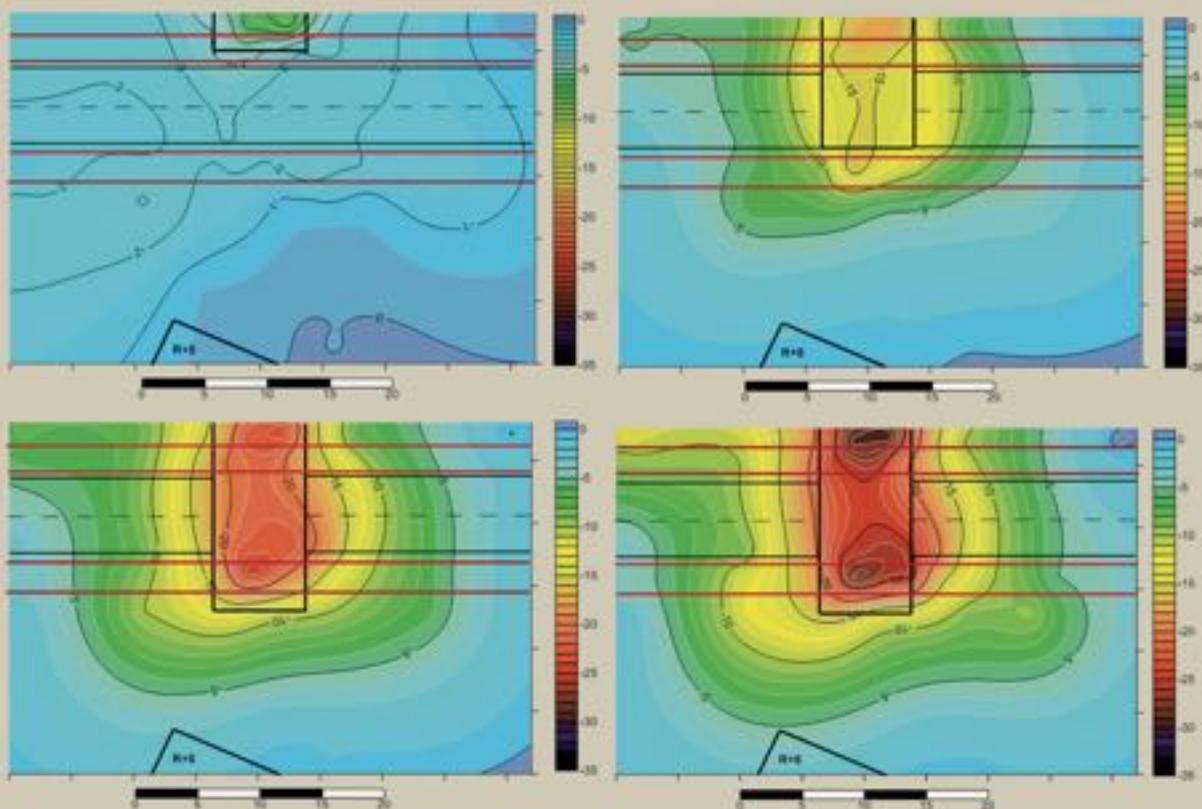
8- Modèle EF 3D complet - Déplacements verticaux.
9- Évolution de la cuvette de tassement (isovaleurs des tassements en mm).

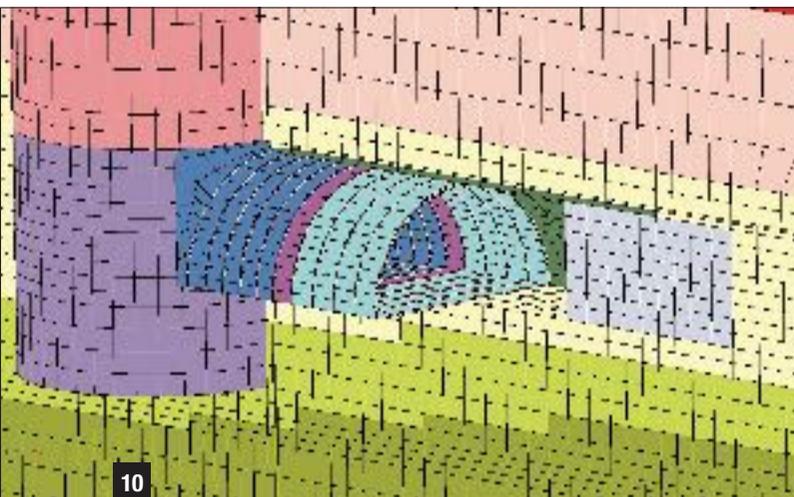
8- Complete 3D FE model - Vertical movements.
9- Evolution of the subsidence basin (subsidence iso-values in mm).

ciment. La technique de jet triple, quant à elle, s'est révélée bien moins efficace pour la mise en œuvre de colonnes de jet grouting dans ces formations. Lors des travaux de terrassement de la demi-section supérieure de la gale-

rie, le dispositif d'auscultation a mis en évidence des tassements importants en surface. Ces déformations résultent des travaux en cours, mais également, pour une certaine partie, des effets différés des travaux précédents, tels que la réa-

ÉVOLUTION DE LA CUVETTE DE TASSEMENT (isovaleurs des tassements en mm)





10

© GEOS

lisation des colonnes de jet, du boulonnage de front et de la voûte parapluie. Les études d'exécution de l'ouvrage qui utilisent les paramètres géomécaniques du marché de travaux, l'étude de sensibilité du modèle ainsi que les calculs de rétro-analyse ont montré qu'une simple dégradation des paramètres de sol dans une plage de valeurs réalistes n'était pas suffisante pour recalibrer le modèle numérique 3D sur les déformations observées *in situ* et qu'il est très important de pouvoir intégrer dans la modélisation les conditions réelles de réalisation des terrassements et des soutènements.

Ces adaptations de la modélisation, pour être pertinentes, nécessitent un suivi renforcé des conditions réelles d'exécution de l'ouvrage.

Ces différentes analyses montrent, d'une part, qu'une modélisation par éléments finis 3D est importante car elle fournit des éléments fiables de compréhension du comportement des sols, des ouvrages et de leur interaction, mais,

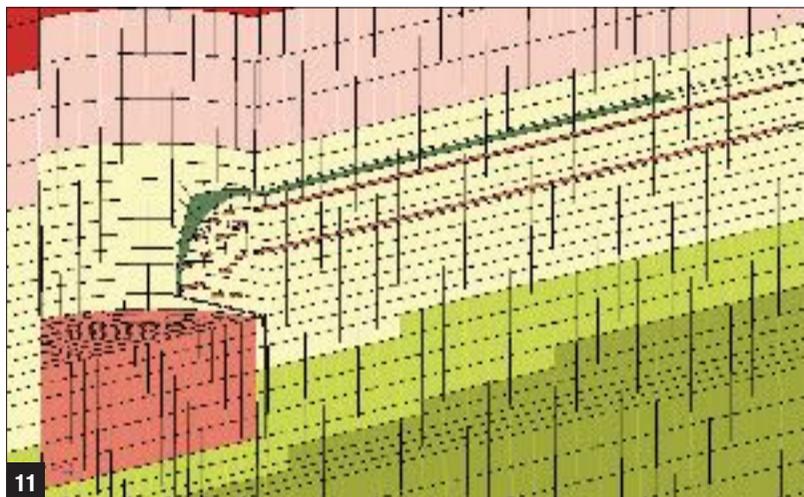
10- Modélisation du soutènement de la galerie.

11- Modélisation du renforcement du front de taille - Modélisation unitaire des boulons.

10- Model of the gallery retaining structure.

11- Model of consolidation of the tunnel face - Individual model of bolts.

d'autre part, qu'une telle approche n'est pas en capacité d'intégrer tous les paramètres les plus complexes des travaux géotechniques. Ainsi, il convient d'avoir toujours une approche prudente et raisonnable dans l'interprétation des modélisations par éléments finis 3D,



11

© GEOS

en retenant qu'une modélisation complexe peut seulement chercher à se rapprocher au mieux des observations faites sur le terrain, mais ne permettra

jamais de représenter tous les mécanismes en jeu, qui ne peuvent pas toujours être compris dans toute leur complexité et tous leurs détails. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : RATP Département Maîtrise d'Ouvrage des Projets
MAÎTRE D'ŒUVRE : RATP Département Ingénierie
GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Parengé, Keller, Geos

PRINCIPALES QUANTITÉS

GÉOMÉTRIE DU PUIS : 9 m de diamètre et 18 m de profondeur environ
GÉOMÉTRIE DE LA GALERIE : 7 m de diamètre et 17 m de profondeur environ
BOULONS ACIER POUR VOÛTE DIVERGENTE : 25 unités de 20 m de longueur, soit un total de 500 m
BOULONS EN FIBRE DE VERRE POUR RENFORCEMENT DU FRONT DE TAILLE : 44 unités entre 14 et 26 m d'une longueur total de 850 m environ
MICROPieux POUR SUPPORTER LE REVÊTEMENT DE LA DEMI-SECTION SUPÉRIEURE : 34 unités de 8,5 m de longueur, soit un total de 290 m

ABSTRACT

RATP LINE 11 AT LES LILAS - CALMETTE GEOTECHNICAL TEST SHAFT AND GALLERY

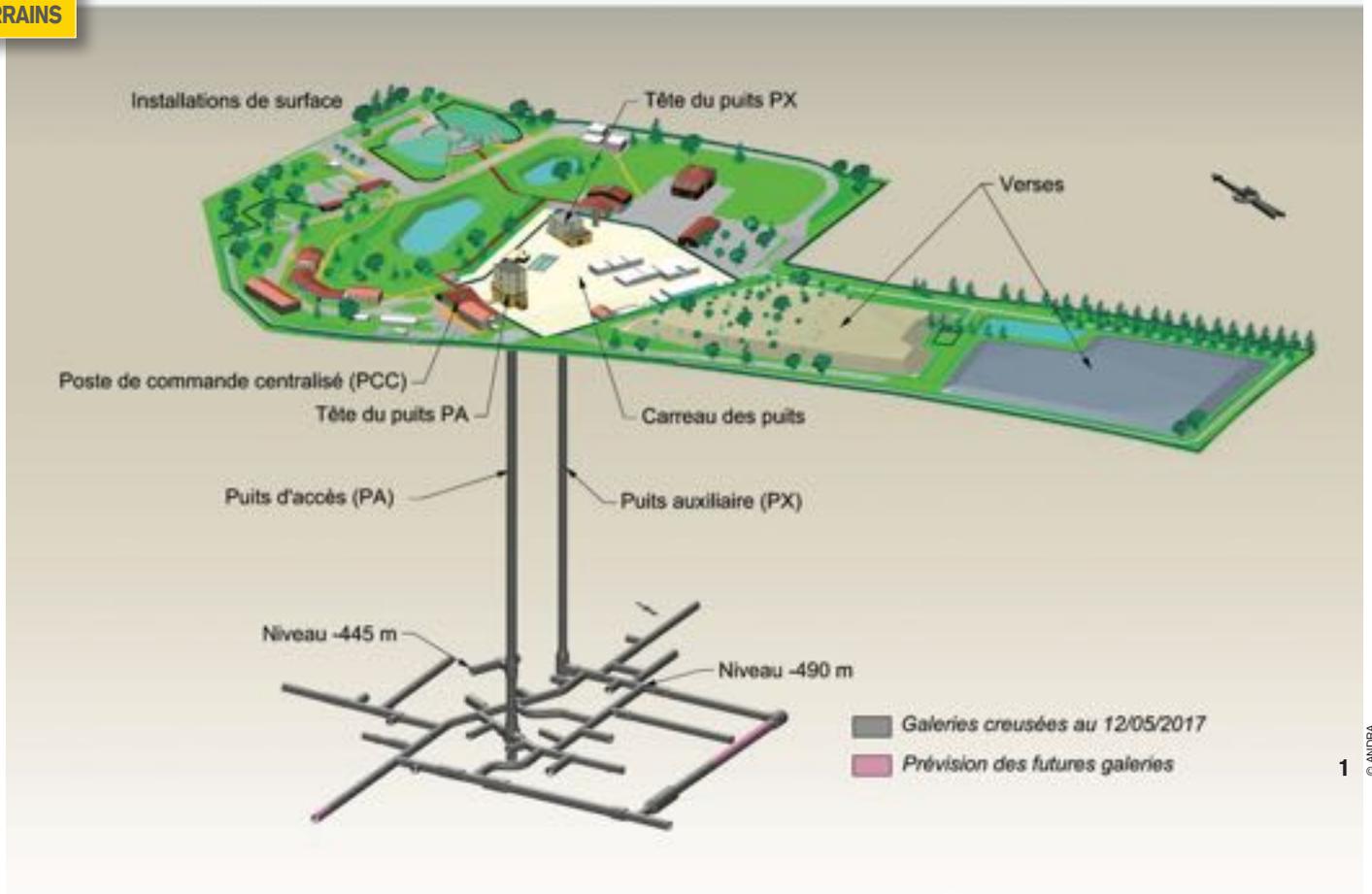
STÉPHANE CURTIL, GEOS - BENEDIKT STÜTZL, GEOS - CÉLIA WOLFF, GEOS - CAMILLE GEORGE, RATP MOP/PL11

The Calmette geotechnical test shaft and gallery were dug by a conventional method as part of the preparatory work for the extension of Paris metro line 11. The twofold objective of the early construction of this structure was to study the effectiveness of the jet grouting technique in plastic clays, using a test section comprising 6 columns, and adjusting the soil geotechnical parameters, using a 3D finite element model fitting the real deformation of the ground and the structure. This back analysis on the geotechnical parameters made it possible to specify the input data and thus optimise the design of the main engineering structures on Line 11. □

LÍNEA 11 DE LA RATP EN LES LILAS - POZO Y GALERÍA DE ENSAYOS GEOTÉCNICOS CALMETTE

STÉPHANE CURTIL, GEOS - BENEDIKT STÜTZL, GEOS - CÉLIA WOLFF, GEOS - CAMILLE GEORGE, RATP MOP/PL11

El pozo y la galería de ensayos geotécnicos Calmette se han perforado por el método tradicional, en el marco de las obras de preparación para la ampliación de la Línea 11 del metro de París. La construcción prevista de esta obra tenía como doble objetivo el estudio de la eficacia de la técnica del jet grouting en arcillas plásticas, utilizando una plataforma de ensayo formada por 6 columnas de jet grouting, y el calibrado de los parámetros geotécnicos de los suelos, mediante una modelización de elementos finitos en 3D ajustada según las deformaciones reales de los terrenos y de la construcción. Este retroanálisis basado en los parámetros geotécnicos ha permitido precisar los datos de entrada y, de este modo, optimizar los dimensionamientos de las principales construcciones de la Línea 11. □



LABORATOIRE DE RECHERCHE DE L'ANDRA À BURE - EIFFAGE GÉNIE CIVIL RÉALISE DES GALERIES À -500 m

AUTEURS : PASCAL GOURGUES, DIRECTEUR DE CHANTIER, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - FRÉDÉRIC PAYEN, INGÉNIEUR TRAVAUX, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - ANNE-EMMANUELLE CORMIER, ANIMATRICE QSE, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

EIFFAGE GÉNIE CIVIL RÉALISE DEPUIS 2008, POUR LE COMPTE DE L'ANDRA, UN RÉSEAU DE GALERIES SOUTERRAINES SUR LE SITE DE BURE (55). CES OUVRAGES SONT EXÉCUTÉS, AU MOYEN DE 3 MÉTHODES DE CREUSEMENT CONJUGUÉES À 5 TYPES DE SOUTÈNEMENTS DIFFÉRENTS, À DES FINS SCIENTIFIQUES. LES INGÉNIEURS DE L'ANDRA PEUVENT ALORS PROCÉDER À DIVERSES EXPÉRIMENTATIONS AFIN DE VÉRIFIER LA FAISABILITÉ D'UN STOCKAGE DE DÉCHETS RADIOACTIFS À VIE LONGUE EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE.

À la limite de la Meuse et de la Haute Marne, sur le territoire de la commune de Bure, se trouve le laboratoire souterrain de l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs). C'est dans ce secteur rural qu'Eiffage Génie Civil creuse un réseau de galeries à 490 m de profondeur.

L'accès aux installations se fait par 2 puits de 4 et 5 m de diamètre. Le puits principal, aussi appelé puits PA est équipé d'un ascenseur de 14 places et d'un ascenseur de secours

de 8 places. Ce puits est également équipé d'une cage permettant la descente et la remontée de l'ensemble des matériels présents dans les galeries ainsi que le marinage des déblais issus des différents creusements. Le puits PX est équipé de deux ascenseurs (figure 1).

En surface, le site du laboratoire couvre une surface de 17 ha sur laquelle se trouvent les bâtiments techniques et administratifs ainsi que les verses destinées à recevoir les déblais remontant du fond.

TROIS MÉTHODES DE CREUSEMENT

Le creusement des galeries est réalisé au moyen de 3 machines sensiblement différentes. La plus couramment utilisée est une pelle Brokk 330 équipée d'un brise-roche hydraulique. Le marinage est assuré par un « charge et roule » ainsi que des mini-dumpers. Cette pelle permet également la mise en œuvre de béton projeté en adaptant une lance à béton en lieu et place du godet ou du BRH. Elle peut aussi être utilisée dans le cadre de manutentions diverses telles

1- Représentation schématique surface et fond.

1- Schematic representation of surface and bottom.



© EIFFAGE
2

dans une des amorces, creusée au préalable au moyen de la pelle Brokk, avec nombre de palans et de tire-fort. Les premiers essais de fonctionnement ont été réalisés dès le mois de décembre 2009.

Cette méthode d'excavation générant une importante quantité de poussière et l'usage de l'eau pour l'aspersion du marin ou la réalisation de forage étant proscrite compte tenu de la nature de matériau, une installation de dépoussiérage et de ventilation a été conçue spécifiquement pour le site. L'unité de dépoussiérage et de ventilation a une capacité de 600 m³ par minute avec des gaines rigides de 800 mm de diamètre. La troisième machine utilisée pour le creusement des galeries est un tunnelier à attaque ponctuelle, fabriqué par la société Herrenknecht. Compte tenu des contraintes du site, en particulier l'exiguïté des galeries déjà réalisées et les capacités limitées de la cage à matériel, la conception de la machine a fait l'objet de plusieurs mois d'études et revues de conception. ▷

que la pose de cintre ou la mise en place de gaines rigides de ventilation (figure 2).

Dans quelques cas particuliers la pelle Brokk, après avoir réalisé une amorce de creusement, a été remplacée à des fins expérimentales par une machine à attaque ponctuelle de type Eickoff. Cette machine a été reconditionnée pour être utilisée sur ce site. De plus, compte tenu de ses dimensions, un démontage complet a dû être réalisé afin de la descendre dans les galeries souterraines, la ligne matériel ayant une capacité de 5 t au maximum (figure 3). Le montage en galerie a été réalisé

- 2- Excavation à la pelle Brokk.
- 3- Excavation à la machine à attaque ponctuelle.
- 4- Réalisation de la galerie GVA en sections divisées.

- 2- Excavation by Brokk excavator.
- 3- Excavation by partial-face tunneling equipment.
- 4- Execution of the GVA gallery in divided sections.



4



© EIFFAGE
3

Les principaux critères à prendre en compte étaient que la machine soit équipée d'une fraise et qu'elle soit à front ouvert afin de permettre l'observation par les géologues de l'Andra du comportement du terrain, d'une foreuse permettant la réalisation de boulons de pré-soutènement du front et permettre la pose de voussoirs préfabriqués.

Une chambre de montage a été réalisée en deux demi-sections afin de procéder à l'assemblage du tunnelier de 180 t, descendu en 120 colis. Des monorails fixés en voûte ont permis d'accrocher les moyens de levage nécessaires à l'assemblage des 17 segments du bouclier (figure 4).

Fin 2014, Eiffage Génie Civil a entrepris les travaux de creusement d'une nouvelle chambre de montage de 9,00 m de diamètre réalisée en deux demi-sections.

Cette opération s'est achevée en fin d'année 2015 par la réalisation d'un radier provisoire fortement armé devant accueillir le tunnelier en cours de montage (figure 5).

Les deux parties distinctes, correspondent à la zone du bouclier de la



5

5- Ferrailage du radier de montage du tunnelier.

6- Tunnelier en cours de montage.

5- Reinforcement of the TBM assembly raft.

6- TBM undergoing assembly.

machine située au plus près du front de taille, la zone de forme trapézoïdale correspondant à l'emprise du train suiveur. Le bétonnage a été réalisé en 6 plots pour tenir compte des cadences de bétonnage de l'ordre de 3 m³ par heure, résultant des performances de la cage à matériel et des moyens de transport du béton par bennes de 500 l (figure 6).

Trois mois ont ensuite été nécessaires aux équipes d'Eiffage Génie Civil et de Herrenknecht pour monter la machine et réaliser les premiers essais de fonctionnement.

Le tunnelier a été utilisé en 2013 pour réaliser une première galerie de 75 m de long environ puis a été démonté suite à une sur-excavation de la galerie après modification de la longueur de

la fraise d'abattage, afin de pouvoir augmenter le gabarit de creusement et ainsi permettre le positionnement des moyens de levage nécessaires au démontage.

Les pièces les plus volumineuses ont été stockées dans les installations souterraines en vue du creusement d'une galerie perpendiculaire à la précédente.



6

5 TYPES DE SOUTÈNEMENTS DIFFÉRENTS

L'une des particularités de ce chantier réside dans la grande variété des types de soutènement mis en œuvre. Celle-ci ne résulte pas de variations de comportement géologique et géotechnique de la couche d'argilite dans laquelle sont creusées les galeries mais de demandes de l'Andra dans le cadre de ses expérimentations.

CINTRES TH ET BÉTON PROJETÉ

Le soutènement de la majorité des galeries est constitué de cintres TH. Le choix de ce type de cintres résultait de leur capacité à coulisser ce qui permet d'encaisser les déformations inhérentes au terrain rencontré et la profondeur à



© EIFFAGE
7

7- Soutènement par cintres.

8- Voussoir bi couche.

9- Soutènement par cales compressibles.

7- Supporting by centering.

8- Double-layer segment.

9- Supporting structure of compressible spacers.



© ANDRA
8



© EIFFAGE
9

laquelle se trouvent les galeries. Ils sont associés à des boulons radiaux en acier et à une couche de béton projeté fibré. En fonction du diamètre de la galerie, les boulons ont une longueur de 3,00 m ou de 4,50 m (figure 7). Dans le cas de boulons situés à proximité de futurs forages réalisés à des fins scientifiques, les barres en acier de 25 mm de diamètre sont remplacées par des barres en fibre de verre de longueur et de diamètre équivalents. Ce soutènement est généralement associé à une excavation au BRH ou de façon plus occasionnelle à un creusement avec la machine à attaque ponctuelle.

DES CALES COMPRESSIBLES EN BÉTON FIBRÉ

Lors du creusement effectué avec la machine à attaque ponctuelle, le soutènement le plus fréquemment utilisé est assuré par des cales compressibles en béton afin de permettre la déformation souple de la coque de soutènement sous l'effet de la convergence du terrain. Ces cales sont de forme légèrement trapézoïdale et mesurent 1,20 m de long. Elles sont constituées de béton auquel sont ajoutées des billes de matériaux compressibles. Elles sont armées par des fibres métalliques et une feuillure en acier.

Dans ce cas la galerie est parfaitement circulaire. Elles sont fixées au parement, après mise en œuvre d'une couche de béton projeté de confinement et un boulonnage radial, par des barres en acier scellées dans le terrain et dont l'extrémité côté intrados est filetée. Ceci permet de procéder à un réglage précis de la position de ces cales dans la section (figure 9).

Dans le cadre du laboratoire souterrain de l'Andra, ce mode de soutènement requiert, lors de la pose de ces douze cales, la présence d'un géomètre, celles-ci servant également de gabarit pour la mise en œuvre de béton projeté. En effet, les intervalles entre ces cales sont ensuite remplis par 18 cm de béton projeté en deux couches successives après mise en œuvre entre elles d'une nappe de treillis soudé.

VOUSOIRS EN BÉTON ARMÉ

Dans les galeries creusées avec le tunnelier à attaque ponctuelle, le soutènement est assuré par des anneaux constitués de 8 voussoirs identiques et d'une clé. Leur largeur est de 80 cm pour une épaisseur de 45 cm. Deux galeries perpendiculaires ont été réalisées avec ce soutènement.



10

© EIFPAGE

Il convient de préciser que, dans les deux cas, le remplissage du vide annulaire est assuré soit par un mortier de bourrage classique, soit par un mortier compressible. Ce dernier est obtenu par addition de billes de polystyrène à un mortier. Le mélange est réalisé en usine puis conditionné en big bags. L'hydratation du mélange se fait dans un malaxeur situé dans l'une des galeries du laboratoire.

ajouté sur l'extrados et sur les rives de la couche de coques afin d'empêcher que le mortier de bourrage ne vienne obstruer les vides et ne réduise de fait les propriétés de cette couche compressible. Ces anneaux de voussoirs compressibles sont en cours de mise en œuvre à l'extrémité Est de la galerie GVA.

D'un point de vue géométrique l'extrados des voussoirs compressibles

10- Bétonnage de la contre-voûte galerie GER.

11- Coffrage de la voûte galerie GER.

10- Concreting of the subsidiary lining in the GER gallery.

11- GER gallery roof formwork.

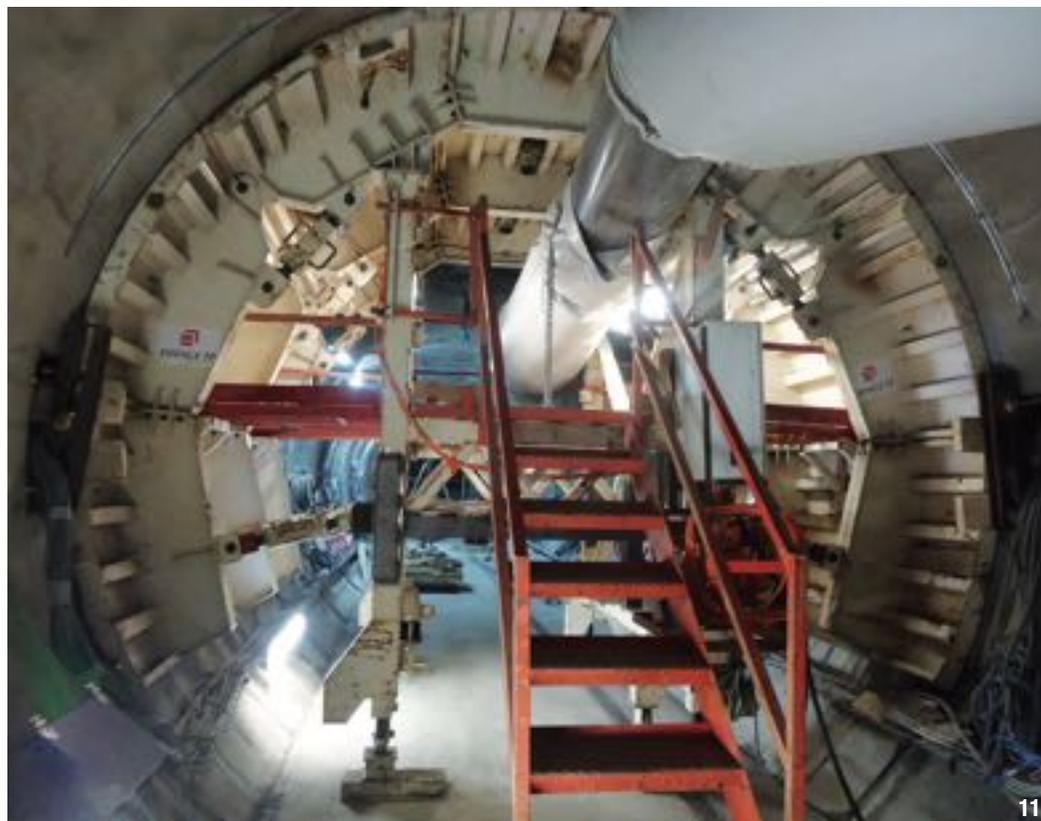
est aligné avec celui des voussoirs en béton armé moins épais de 13 cm. La variation d'épaisseur s'applique au niveau de l'intrados.

Ce changement de section a imposé de modifier le diamètre des 17 vérins de poussée du tunnelier avant le remontage de la machine, puis de modifier les patins d'appui de ces mêmes vérins lors de la transition voussoirs classiques - voussoirs compressibles.

VOUSSOIRS BI COUCHE

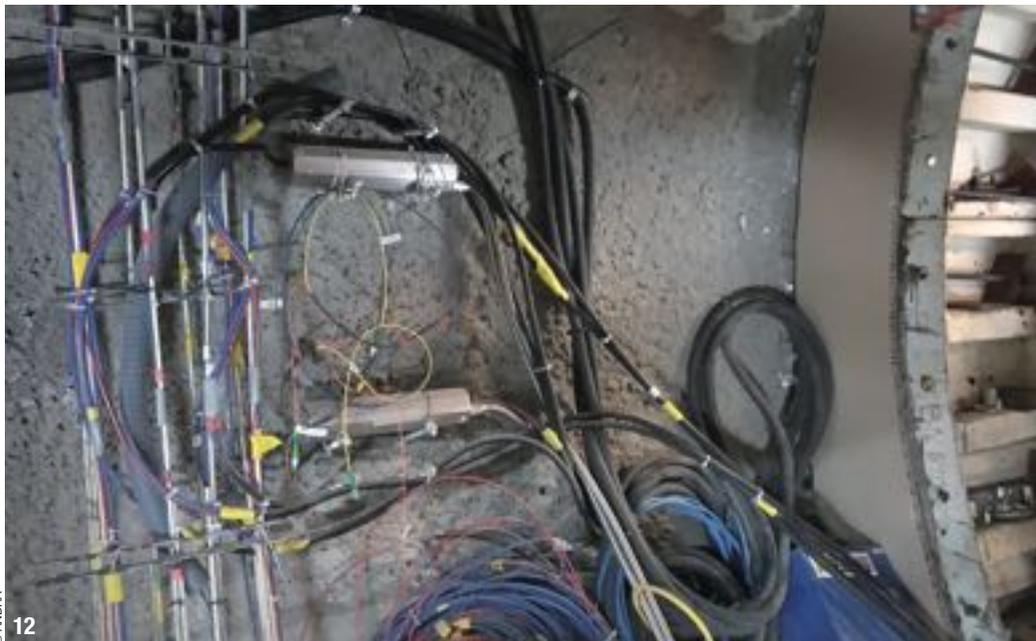
À la demande de l'Andra, des voussoirs dits compressibles ont été mis en œuvre dans la deuxième galerie creusée au tunnelier. La largeur de ces éléments est de 80 cm mais leur épaisseur est sensiblement modifiée. En effet une couche compressible de 13 cm a été ajoutée sur l'extrados des voussoirs portant ainsi leur épaisseur à 58 cm (figure 8).

Cette couche compressible est constituée de coques cylindriques de 15 mm et de 2 mm d'épaisseur. Ce produit (cette technologie) est protégé(e) par des brevets dont l'Andra et la société Cmc partagent la propriété. Elles sont fabriquées avec de l'argilite issue du creusement des galeries et sont fixées sur le béton encore frais des voussoirs en béton armé similaires à ceux mis en œuvre précédemment. Elles sont liées entre elles par une barbotine. La quantité de barbotine à mettre en œuvre a fait l'objet d'une étude approfondie afin d'assurer une liaison correcte des coques sans toutefois réduire la compressibilité attendue de la couche. De plus, un mortier de fermeture a été



11

© EIFPAGE



© ANDRA
12

REVÊTEMENT EN BÉTON

Deux galeries, creusées avec la machine à attaque ponctuelle et dont le soutènement provisoire a été assuré par des cales compressibles en béton, ont été revêtues en béton coffré. Afin de permettre l'atténuation du phénomène de convergence des galeries, le revêtement a été mis en œuvre dans un délai de 6 mois minimum après le creusement (figure 10).

Le marché prévoyait de revêtir la totalité de la galerie. De ce fait, le bétonnage de la contre-voûte a été réalisé dans un premier temps, suivi du bétonnage du radier puis de la voûte. L'outil coffrant de la contre-voûte et de la voûte a été conçu et fabriqué en partenariat entre Eiffage Génie Civil et Les Ateliers Brivadois (figure 11).

Le bétonnage a été réalisé par plots de 3,60 m de long, l'épaisseur de béton

12- Expérimentations scientifiques en galerie GER.

12- Scientific experiments in the GER gallery.

théorique étant de 32 cm. Le béton utilisé est de type C60/75 livré sur le site sous forme de big bags de mélange sec d'une tonne. L'hydratation et le malaxage du béton ont été effectués au moyen d'un malaxeur situé dans une des galeries du laboratoire (figure 12). Il convient de préciser que le grand nombre d'expérimentations scientifiques mises en œuvre dans le revête-

ment par les ingénieurs de l'Andra ou leurs prestataires a nécessité plusieurs réunions de coordination afin de bien comprendre les besoins de chacun et de planifier de façon très précise les interventions successives.

Ce type d'expérimentation n'est pas propre au revêtement annulaire mais est mis en œuvre dans une grande partie des galeries du laboratoire souterrains que ce soit avant, pendant ou après le creusement des galeries.

Cette situation impose que l'entreprise en charge des travaux prenne la mesure des besoins de l'Andra et qu'elle les intègre au mieux tant au niveau documentaire que dans l'enchaînement des travaux. Un partenariat de plusieurs années permet à l'ensemble des intervenants de pouvoir travailler, de façon constructive, à la bonne marche de ce chantier atypique. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

EXCAVATION : 28 000 m³

CINTRES TH ET CARRURES : 725 t

BOULONS RADIAUX : 35 000 m

BOULONS DE FRONT EN FIBRE DE VERRE : 16 000 m

BÉTON PROJETÉ : 26 000 m²

BÉTON COULÉ : 1 800 m³

CALES COMPRESIBLES : 1 600 u

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs)

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Groupement Antea Group / Bg consultants

ENTREPRISE : Eiffage Génie Civil Région Rhône Alpes Auvergne

ABSTRACT

ANDRA RESEARCH LABORATORY AT BURE - EIFFAGE GÉNIE CIVIL CONSTRUCTS GALLERIES AT -500 m

PASCAL GOURGUES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - FRÉDÉRIC PAYEN, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - ANNE-EMMANUELLE CORMIER, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

In the Andra laboratory at Bure, Eiffage is digging underground galleries in the argillite at a depth of -490 m. This laboratory is studying the feasibility of nuclear waste storage at great depth. Three different excavation methods are used: a conventional method with a Brokk excavator fitted with a hydraulic rock breaker, the use of an Eickhoff partial-face tunnel boring machine, and a Herrenknecht partial-face TBM method. The supporting structure is executed in five different ways for scientific experimentation purposes: Toussaint-Heintzmann arch and shotcreting, compressible spacers in fibre-reinforced concrete, reinforced concrete segments, double-layer segments, and compressible spacers in concrete and shuttered concrete. □

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE LA ANDRA EN BURE - EIFFAGE GÉNIE CIVIL REALIZA GALERÍAS A -500 M

PASCAL GOURGUES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - FRÉDÉRIC PAYEN, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - ANNE-EMMANUELLE CORMIER, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

Eiffage está perforando en el laboratorio de la Andra, en Bure (departamento 55), galerías subterráneas a -490 m en terreno arcilloso. Este laboratorio estudia la viabilidad de un almacenamiento de residuos nucleares a gran profundidad. Se utilizan tres métodos de perforación: método tradicional con una pala Brokk provista de un martillo hidráulico, utilización de una máquina de ataque puntual Eickhoff y método con tuneladora de ataque puntual Herrenknecht. La contención se realiza de cinco formas distintas según las necesidades de los experimentos científicos: cimbra TH y hormigón proyectado, calces comprimibles de hormigón fibrado, dovelas de hormigón armado, dovelas bicapa, calces comprimibles de hormigón y hormigón encofrado. □



1

© CONSEIL DÉPARTEMENTAL DE LA SAVOIE

MISE AUX NORMES DU TUNNEL DU CHAT

AUTEURS : BENOIT CLARON, DIRECTEUR DE TRAVAUX, EIFFAGE GÉNIE CIVIL -
ARNAUD DELACOURT, CHEF D'AGENCE, EIFFAGE GÉNIE CIVIL

APRÈS TROIS ANNÉES DE TRAVAUX, EIFFAGE GÉNIE CIVIL A ACHÉVÉ LE 17 NOVEMBRE 2017, POUR LE DÉPARTEMENT DE LA SAVOIE, LA MISE AUX NORMES DU TUNNEL DU CHAT SITUÉ SUR LES COMMUNES DE SAINT-JEAN-DE-CHEVELU ET DE BOURDEAU. CETTE OPÉRATION A PERMIS LA REQUALIFICATION DE CET OUVRAGE AVEC UNE RÉNOVATION COMPLÈTE DU TUNNEL ROUTIER ET LA CRÉATION D'UNE NOUVELLE GALERIE DE SÉCURITÉ DE 1 500 m DE LONGUEUR CONNECTÉE PAR 4 RAMEAUX D'ÉVACUATION ET 14 CARNEAUX DE DÉSENFUMAGE.

CONTEXTE ET SITUATION DE L'OPÉRATION

82 ans après son achèvement en 1932 par la société Borie (qui deviendra Eiffage), Eiffage génie civil a été désigné adjudicataire de la mise en sécurité du tunnel du Chat.

Situé sur la route départementale (RD) 1504, le tunnel du Chat, long de 1 500 m, relie le bassin chambérien et l'avant-pays savoyard (figures 1 et 3). 11 500 véhicules l'empruntent chaque jour avec les restrictions de circulation suivantes :

→ Interdit aux véhicules transportant des marchandises dangereuses ;



2

© SUPERFOCUS

1- Vue ancienne tunnel du Chat côté Bourdeau.

2- Vue d'un des premiers tirs d'explosifs côté Ouest.

1- Old view of Chat Tunnel on Bourdeau side.

2- View of one of the first explosive blasts on the West side.

PLAN DE SITUATION DU TUNNEL DU CHAT



3- Plan de situation du tunnel du Chat.

4- Représentation du projet lors de la conception de l'opération.

3- Location drawing of Chat Tunnel.

4- Representation of the project at operation design.

- Interdit aux véhicules > 3,50 m de haut, 2,35 m large et 7,5 t, sauf dérogations ;
- Interdit aux piétons et cyclistes ;
- Limité à 50 km/h.

Il peut constituer le seul axe de passage en période hivernale avec la fermeture du col (638 m d'altitude) lors des périodes neigeuses.

Ce tunnel a été transféré au Conseil départemental de la Savoie (CD 73) au 1^{er} janvier 2006. À cette date, la route nationale (RN) 504 et son tunnel du Chat devient la RD 1504.

Dès 2007, le CD 73 octroiera 4,5 M€ de travaux pour la mise à niveau des équipements (réseau incendie et niche, câble radio, signalétique, etc.).

Malgré cela, des écarts aux règles de sécurité subsistent, notamment sur l'évacuation des usagers en cas d'incendie, l'accès des secours et la ventilation.

En 2004, le Comité d'évaluation de la sécurité des tunnels routiers (Cestr) avait rappelé le caractère précaire de l'ouverture du tunnel : « sans modification radicale de ses caractéristiques, l'exploitation actuelle ne peut être admise qu'à titre temporaire, avec les restrictions au passage des poids lourds et sans extension du régime dérogatoire ».

Le CD 73, maître d'ouvrage, entame donc la préparation de la mise aux normes à partir de 2008 et jusqu'à 2014 :

- Concertation avec les élus, riverains et acteurs économiques ;
- Création du comité de concertation et de suivi ;
- Avis Cnesor d'octobre 2009 puis février 2013 ;
- Enquête publique et acquisitions foncières ;
- Élaboration du projet et du dossier de consultation des entreprises ;

REPRÉSENTATION DU PROJET LORS DE LA CONCEPTION DE L'OPÉRATION



3

4

→ Travaux préparatoires (carrefours giratoires aux deux têtes et sécurisation de la route du col).

Les objectifs de ce projet pour le maître d'ouvrage (MOA) sont :

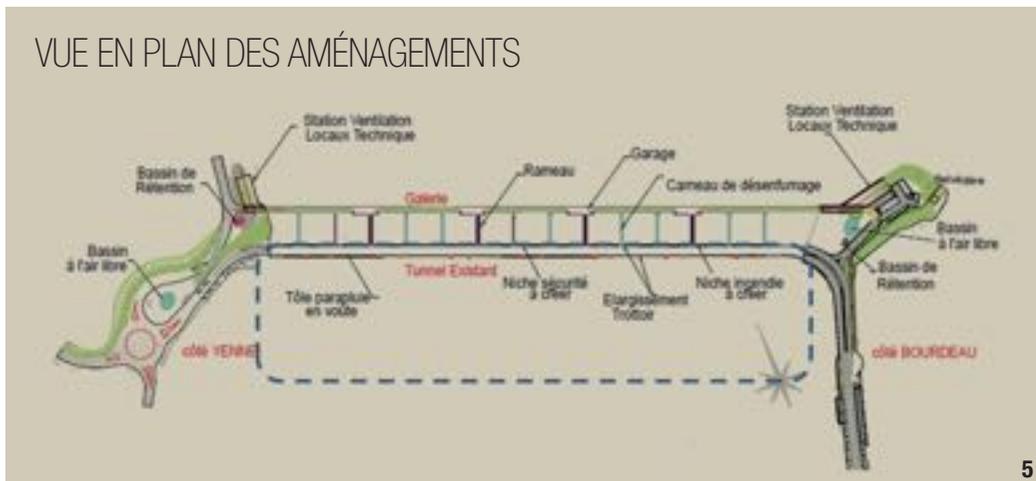
- D'obtenir un niveau de sécurité optimal pour les usagers ;
- De renforcer l'attractivité économique de l'avant-pays savoyard ;
- De maîtriser le trafic poids lourds dans le tunnel ;
- D'offrir un itinéraire sécurisé aux cyclistes et aux piétons.

Après avoir étudié plusieurs solutions (bitubes connectés, agrandissement du tube, nouveau tunnel avec reconversion de l'ancien en galerie de secours), le maître d'ouvrage décide de réaliser une galerie de secours parallèle et de rénover le tube existant (figure 4).

Les contraintes principales pour le maître d'ouvrage durant le chantier sont les suivantes :

- Réalisation des travaux en maintenant le tunnel ouvert au maximum, en assurant la fluidité du trafic et en préservant l'utilisation du tunnel pendant la période hivernale et les trafics de pointe ;
 - Garantir la sécurité des usagers routiers et des intervenants sur chantier ;
 - Maîtriser les temps de fermeture de l'ouvrage ;
 - Limiter les nuisances aux riverains.
- L'opération se scinde en deux phases :
- Délai distinct n°1 de 24 mois :
 - Création d'une galerie de sécurité. Parallèle au tunnel, elle permet l'accès des secours et l'évacuation des usagers par 4 rameaux de connexion au tunnel. Elle permet

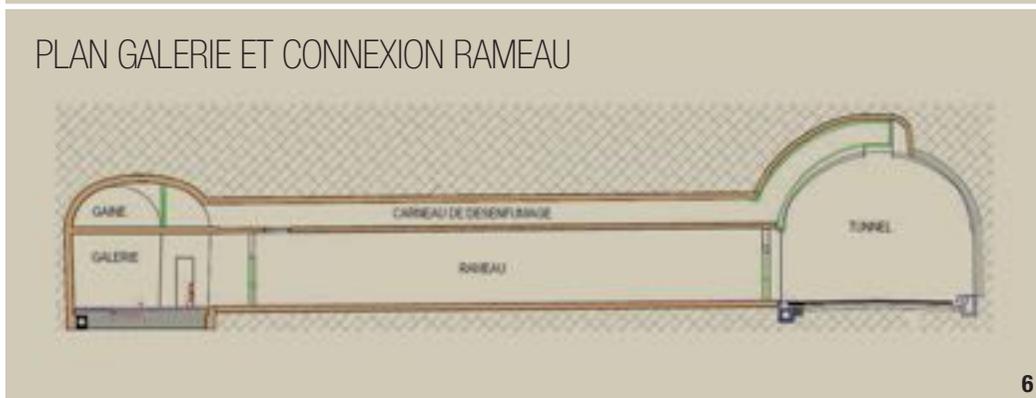
VUE EN PLAN DES AMÉNAGEMENTS



5

© SYSTRA

PLAN GALERIE ET CONNEXION RAMEAU



6

© CONSEIL DÉPARTEMENTAL DE LA SAVOIE

également le désenfumage du tunnel par l'intermédiaire de 14 carneaux connectés au tunnel et une gaine de désenfumage en partie haute de cette même galerie. Cette première partie comprend les terrassements et confortements des têtes et les équipements de la galerie (éclairage, câblage, équipements des rameaux).

- Création des locaux de ventilation formant les fausses-têtes de chaque côté de l'ouvrage.
- Délai distinct n°2 de 6 mois :
 - Rénovation complète du tunnel existant.
 - Aménagements et réseaux extérieurs (figures 5 et 6).

La maîtrise d'œuvre du projet est attribuée à un groupement composé

de Systra (mandataire), Hbi et Hgm. Au terme de l'appel d'offre, le marché de travaux est attribué fin 2014 à un groupement constitué d'Eiffage Génie Civil (mandataire), Clemessy, Engie et Eiffage Route.

LES TRAVAUX

Le maître d'ouvrage notifie le démarrage des travaux fin février 2015.



7

© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

5- Vue en plan des aménagements.

6- Plan galerie et connexion rameau.

7- Excavation et confortement tête Ouest.

5- Plan view of the improvements.

6- Drawing of the gallery and cross-passage.

7- Excavation and consolidation of portal.

- 8- Confortement tête Est.
- 9- Formations géologiques.
- 10- Foration d'une volée.

- 8- Consolidation of East portal.
- 9- Geological formations.
- 10- Boring of blasting holes.



© EIFAGE GÉNIE CIVIL
8

TERRASSEMENT DES TÊTES ET TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Dans la foulée de cette notification, les travaux de préparation et de terrassement des têtes de la galerie débutent. Les terrassements sont effectués en 6 passes de 2 m de hauteur pour la zone Ouest et 5 pour la zone Est. Dès la seconde passe, une roche dure est ren-

contrée et oblige à réaliser un minage vertical pour l'excavation. Les déblais Ouest servent d'assise pour la déviation de la route départementale 210A. Le confortement des parois est réalisé pour la zone Ouest par un maillage de 2,5 m x 2,5 m de clous HA32 de 3 m à 6 m de longueur et la pose en final d'un grillage métallique pendu/plaqué

(figure 7). Pour la zone Est, un béton projeté est réalisé (15 cm d'épaisseur + ST40C) avec un maillage de 2 m x 2,5 m de clous HA32 de 3 à 9 m de longueur.

La durée de ces travaux a été d'environ 1 mois par tête, travaux en avril 2015 pour la zone Ouest et en juillet 2015 pour la zone Est (figure 8).

CREUSEMENT DE LA GALERIE DE SÉCURITÉ

Formations géologiques principales (figure 9)

Le massif du Chat est un anticlinal déversé vers l'ouest. Ces larges anticlinaux régionaux et leurs failles associées ont ensuite été repris par une nouvelle phase tectonique, avec cisaillement des plis. Les failles normales redressées sont reprises en chevauchement lors de cet épisode comme celle rencontrée dans le tunnel du Chat.

Le contact discordant (contact anormal entre deux formations d'âge très différent), entre le Valanginien à l'ouest et le Bajocien à l'est, est dû principalement au chevauchement des couches du Jurassique sur les couches du Crétacé plus récentes.

Profils de soutènements

La galerie à réaliser a une surface de 26 m². L'excavation à réaliser est en forme de U avec 4 m de largeur et 6 m de hauteur.

Fin mai 2015, l'attaque Ouest débute. Seul quelques dizaines de mètres à chaque tête ont été réalisés en attaque ponctuelle avec un BRH.

Ensuite, l'ensemble du creusement s'est déroulé selon la méthode dite conventionnelle, à l'explosif.

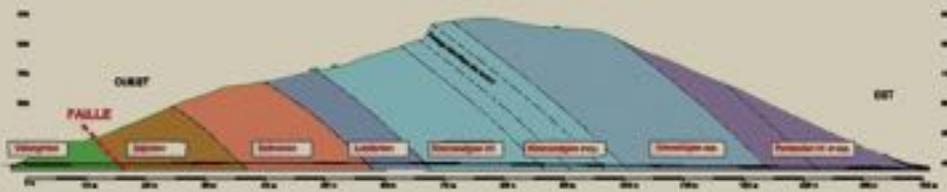
Description cycle et méthodologie

→ Foration : elle est réalisée avec un robot automatisé à deux bras de foration et guidage laser. Les volées courantes sont de 3,00 m à 3,50 m et 1,60 m en zone cintrée (P3 à P6). Pour préparer le tir, 82 forations sont effectuées, de diamètre 45 mm et 2 trous de décompression de 127 mm (figure 10).

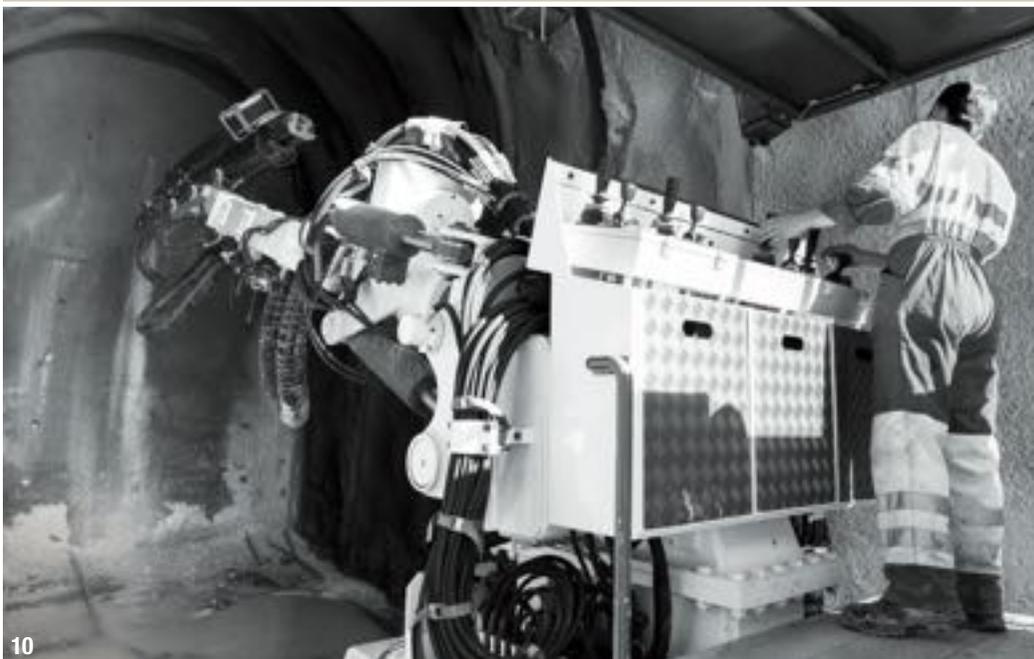
→ Chargement et tirs : des explosifs encartouchés (émulsions) sont utilisés. Ils sont intégrés dans des tubes de précharges préparés en amont dans une poudrière sécurisée. L'amorçage se fait avec des détoneurs non électriques (NONEL) avec retard. Cela afin de créer des tirs séquentiels et ainsi limiter les nuisances sonores et les vibrations. Des cordons détonants permettent le découpage fin du profil. Toutes ces dispositions sont étudiées préalablement avec l'élaboration d'un plan de tir qui est ensuite adapté suivant la nature du rocher rencontré (figure 11). Lors du tir et avant un passage de vérification, le tunnel existant est coupé à la circulation. La durée théorique de coupure est de 40'. Cette durée de coupure sera ramenée à moins de 15' en moyenne sur la durée des travaux. ▷

FORMATIONS GÉOLOGIQUES

Profil en long



© SYSTRA
9



© SUPERFOCUS
10

Des capteurs de vibration sont installés dans le tunnel routier. Ils permettent de s'assurer de ne pas dépasser les seuils imposés dans le marché afin de ne pas dégrader les appareils du tunnel routier (conformément à l'étude vibratoire réalisée en amont). À noter que durant les périodes de trafic de pointe 6h-9h30 et 17h-19h, la coupure du tunnel est interdite. Les tirs durant ces périodes ne sont pas autorisés.

→ **Marinage** : après ventilation et sortie des gaz, les 130 m³ de déblai doivent être évacués de la galerie. Pour cela, un à deux « charge-et-roule » (Sandwich LH410) équipés de godets de 5 m³ sont utilisés suivant la longueur du trajet (figure 12). À partir de 350 m de distance et la possibilité de reprise dans un rameau, deux charge-et-roule sont utilisés afin de ne pas augmenter la durée de marinage (1h30). Les matériaux issus du creusement sont valorisés à 95 % en remblai sur site ou à l'extérieur.

→ **Purge et redressement du front de taille** : cette opération est nécessaire pour, à la fois, assurer le profil de l'excavation et purger toutes les zones de roches friables non excavées par le tir. De plus, elle doit rétablir un front plan pour permettre une foration de la volée suivante de qualité. Une pelle de 14 t équipée d'une fraise réalise cette opération. Durant cette phase, à l'arrière de cet atelier, les équipes profitent de ce temps pour allonger les réseaux d'utilités



11

© SUPERFOCUS

(air comprimé, alimentation en eau et évacuation des eaux chargées) ainsi que la gaine de ventilation au plus près du front. C'est également durant cette phase qu'est réalisé le levé de front avec le « chargé de soutènement » qui définit le type de confortement à mettre en place et précise le nombre d'ancrages à mettre en œuvre.

→ **Confortement** : en section courante, il s'agit d'appliquer entre 5 et 13 cm suivant les profils de béton projeté C30/37 avec fibres métalliques à l'aide d'un robot de projection. Des ancrages de type Swellex à action

11- Chargement d'une volée.

12- Marinage par charge-et-roule.

11- Charging a round.

12- Mucking by underground flexible loader.

immédiate sont ensuite mis en œuvre. Comme indiqué leur nombre évolue suivant la qualité de la roche (3 à 8 par volées). Ils permettent, en complément du béton projeté, de

sécuriser la zone excavée. Les têtes de boulon de la volée sont recouvertes lors de la projection de béton de la volée n+1. Si le profil de soutènement est de type « lourd », les cintres sont mis en œuvre en complément de sécurisation.

Planification générale

Le creusement s'est déroulé côté Ouest en attaque montante jusqu'au PM520 puis en attaque descendante du PM520 au PM960. Malgré la difficulté de l'attaque descendante, notamment en présence d'eau, ce phasage a été privilégié car la surface de la plateforme Est et les conditions d'accès (sortie des PL seulement sous coupure du tunnel une fois toute les heures hors période d'interdiction) sont beaucoup plus contraignantes. Le but est donc de limiter le creusement par le côté Est tout en respectant le planning général. Le PM960 a été atteint à la fin de l'année 2015. Cela a permis le démarrage des activités d'étanchéité et de revêtement sur la zone Ouest (0-960) et la poursuite de l'activité de creusement sur la zone Est (1 500 à 960). Quarante-cinq mètres en profil P6 c'est-à-dire en profil cintré avec voûte parapluie avait déjà été excavé fin 2015.

Cela a permis l'achèvement du creusement fin mai 2016, 12 mois exactement après le début de l'excavation. Les percements des rameaux et carneaux dans le tunnel existant sont exécutés lors de weekends de fermeture du tunnel existant à mesure de l'avancement du creusement.



12

© SUPERFOCUS

Au global, en profil de soutènement « léger » P1, P2, la moyenne d'avancement sera d'environ 40 m par semaine (12 volées de 3 à 3,5 m). Les travaux se déroulent 24h/24 du lundi au samedi matin. La durée moyenne d'un cycle est donc d'environ 9h sachant qu'un poste en fin de semaine est réservé à la réalisation d'un radier en béton.

Cela mobilise une vingtaine d'ouvriers spécialisés durant la période d'excavation.

Problématiques rencontrées

La faible section de la galerie est une contrainte forte pour ces travaux cycliques. En effet, la faible largeur ne permet pas le croisement des engins et interdit la circulation piétonne et les co-activités durant la plupart des phases. Si cela n'est pas pris en compte, les durées de cycles peuvent augmenter très fortement avec l'avancement du creusement et l'allongement des cheminements.

Cela a donc demandé des adaptations constantes de phasages et de méthodologies :

- Création d'excavation plus importante afin d'élargir la galerie et ainsi réaliser des zones de stationnement et/ou croisement pour les engins. C'est indispensable pour maintenir au plus près du front les engins sur chenille comme le robot de foration et permettre le croisement des camions toupies. Cela permet un bon enchaînement des tâches.
- Creusement des rameaux à l'avancement afin de créer des zones de



13
© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

13- Multitubulaire.

14- Couche de roulement.

13- Multitube system.

14- Wearing course.

stockage du marin puis des zones de stockages et stationnement. Cela a permis de maintenir une durée constante du marinage sur toute la durée de l'excavation.

- Balisage des cheminements piétons et procédure de circulation et de communication.

Des adaptations sur le plan de tir et la charge d'explosif ont dû être réalisées pour certaines formations calcaires

dans lesquelles la matrice rocheuse présentait des résistances très élevées (entre 160 et 200 MPa de résistance à la compression). Cela a pu entraîner des difficultés sur le fraisage pour respecter le profil.

La problématique principale a eu lieu lors du creusement Ouest en attaque descendante. Elle a été provoquée par des venues d'eau très importantes avec des débits globaux de plus de 120 m³/h.

Cela a demandé :

- La mise en place de plusieurs captages ponctuels au niveau des fortes arrivées d'eau.
- Un renforcement important d'une part des moyens de pompage au front.
- Un redimensionnement des tuyaux d'exhaure.

- Un redimensionnement des stations de traitement des eaux. En effet, les eaux chargées du tunnel doivent être rejetées dans le milieu naturel avec un taux de MES (matières en suspensions) inférieur à 30 mg/l. Des dispositifs complémentaires de traitement ont donc été mis en œuvre.

Étanchéité et revêtement

Cette étape se réalise en trois phases :

- Réalisation des banquettes : Il s'agit de longrines en béton armé situées en base de piédroits sur 30 à 40 cm de hauteur. Elles constituent l'appui du coffrage et permettent la mise en œuvre de l'étanchéité et du drainage.

- Mise en œuvre de l'étanchéité : un portique motorisé est monté dans la galerie afin de mettre en œuvre un dispositif d'étanchéité par géomembrane.

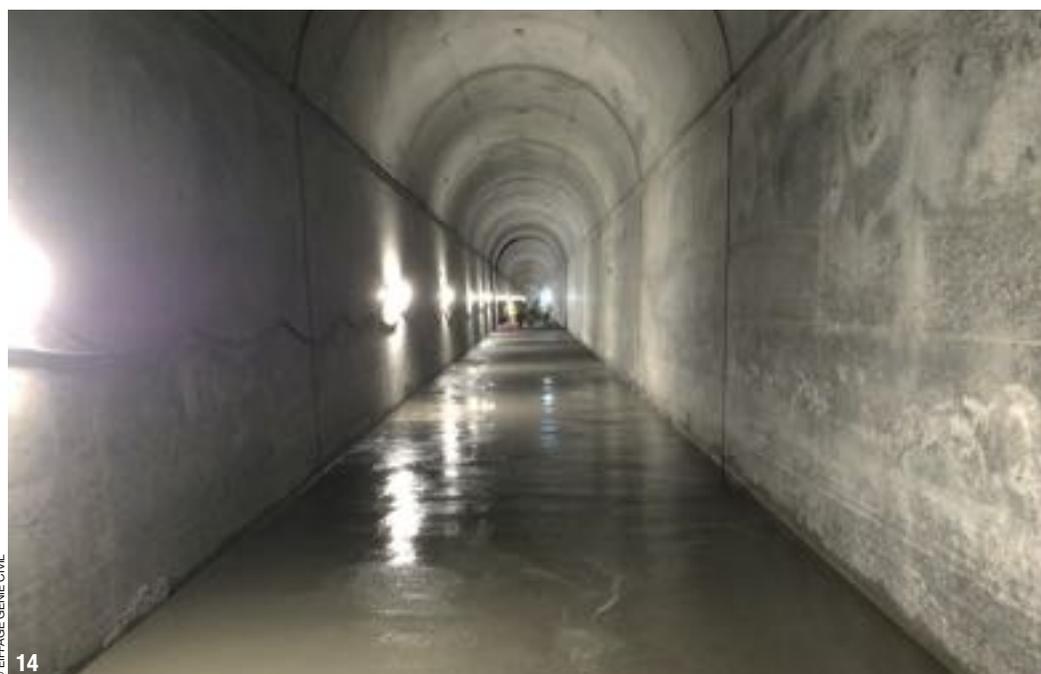
Il se compose :

- D'un géotextile de 1200G fixé sur le béton projeté, qui évite le poinçonnement et le déchirement de la membrane.
- D'une géomembrane d'étanchéité (PVC-P) translucide spécialement agréée pour ce type de projet.

Ce dispositif est complété par :

- Une membrane de protection 19/10° dans les zones ferrallées ainsi qu'au niveau des masques de coffrage.
- Un delta MS au niveau des venues d'eau, en base de piédroit pour le drainage des eaux et au niveau des masques de coffrage pour la protection de la membrane (en supplément du géotextile).
- La mise en place d'un drain PEHD diamètre 160 mm en base de piédroit pour le drainage des eaux.
- La mise en place de bandes d'arrêt d'eau permettant de réaliser des compartimentages de 12,50 m afin d'isoler des portions d'étanchéité pour injection en cas de fuite.

- Bétonnage de la voûte et des piédroits : un outil coffrant de 3,50 m de largeur et 12,50 m de longueur est utilisé afin revêtir la galerie. Il s'agit d'injecter par des pipes de bétonnage situées en piédroit et en voûte un béton de type C30/37 XF1 ou XF2 afin de remplir le vide de 25 cm théorique minimum entre le coffrage et l'extrados. La vibration est réalisée par des vibreurs de peau électriques. Certaines zones définies dans la note de calcul demanderont la mise en œuvre d'un ferrailage. ▷



14
© EIFFAGE GÉNIE CIVIL



15

© SUPERFOCUS

Les masques sont réalisés avec des madriers en section courante pour confiner le béton au droit du coffrage. Ils sont confortés par des fermes métalliques, si besoin, pour l'arrivée du coffrage dans les zones d'élargissement. Dix personnes se relaient en deux postes sur cet atelier afin de réaliser un bétonnage par jour (figure 13). La principale difficulté de l'opération est encore une fois liée à l'étréouissement de la galerie qui ne permet pas le croisement de la circulation et rend difficile le passage des réseaux dans le coffrage. Cela allonge par exemple les cycles de bétonnage de la voûte puisque les camions toupies qui approvisionnent le béton doivent réaliser les 950 m en marche arrière, au démarrage de cette activité. Cela demandera le maintien des équipes sur 3 postes de 8 h afin d'échelonner les activités sur 24 h. En effet, outre l'étanchéité et le revêtement de la section courante, le planning impose la réalisation des mêmes opérations avec un autre outil coffrant spécifique traditionnel au niveau des garages (élargissement au niveau des 4 rameaux) et un autre atelier de coffrage au niveau de la connexion des carneaux. Ainsi par exemple, l'alimentation en béton pour l'atelier garage devra se faire du côté inverse à celui d'approvisionnement de la section courante ou de nuit. Cette activité de coffrage débutera en mars 2016 côté Ouest pour s'achever en octobre 2016 après 150 bétonnages.

Réalisation de la multitubulaire

En partie basse de la galerie, de nombreux réseaux sont à mettre en œuvre. Il s'agit des réseaux de drainages, d'une conduite incendie, d'une liaison 20 KV (liaison de secours entre les deux locaux de chaque côté), de réseaux BT et fibre.

Tous ces réseaux sont mis en œuvre et fixés sur le radier à raison de 80 m en une journée.

La journée suivante est dédiée au bétonnage pour respecter un avancement moyen de 40 m/jour.

15- Coffrage de la dalle de désenfumage.

16- Locaux d'exploitation côté Est.

15- Smoke control slab formwork.

16- Operator rooms on East side.

Encore une fois, la difficulté est dans l'approvisionnement des 30 km de réseaux jusqu'au poste de travail. Pour cela, un « fagotage » spécifique est réalisé en amont afin de glisser les petits diamètres à l'intérieur des gros et ainsi réduire au maximum les manutentions (figure 13).

Dalle de roulement

Afin d'être neutre sur le planning, cette opération de bétonnage des 10 cm de la couche de roulement de la galerie s'effectue de nuit en utilisant le tunnel existant sous fermeture.



16

© ACTOPHOTO

Le béton est ainsi acheminé par pompage par l'intermédiaire des carreaux ou rameaux de liaison afin de réaliser 100 m/nuit (figure 14).

Dalle haute

Afin de séparer la circulation des piétons et cyclistes de la gaine de désenfumage prévue en partie haute de la galerie, une dalle en béton armé est réalisée au rythme de 25 m/jour. Pour effectuer cet avancement, deux tables de coffrages de 12,5 m permettent la mise en œuvre d'un béton dosé à 400 kg de ciment avec accélérateur sur 20 cm d'épaisseur. Des systèmes de fermeture et de chauffage sont également mise en place pour assurer le décoffrage à 10 MPa le lendemain matin.

L'entreprise avait proposé une variante avec une dalle sur appui permettant d'alléger le ferrailage de la dalle et de supprimer les aciers de liaison pour réaliser l'encastrement (figures 15 et 16).

Locaux de ventilation

Simultanément au génie civil de la galerie, les locaux de ventilation formant également les fausses têtes de la galerie sont érigés.

Ils permettent l'installation des extracteurs de fumées ainsi que de toutes les installations électriques et de contrôles commandés nécessaire pour le fonctionnement de la galerie et du tunnel (figure 17).

Équipements

Clemessy pour l'installation électrique et le contrôle commande ainsi qu'Engie ont réalisé la mise en place des équipements de la galerie et des locaux de ventilation. Deux extracteurs situés à chaque extrémité de la galerie de désenfumage permettront, via les carreaux, l'aspiration des fumées dans le tunnel existant au plus près du foyer. Des systèmes de trappes motorisées permettent en effet de fermer ou ouvrir les flux dans les carreaux.



17
© SUPERFOCUS

17- Coffrage de la galerie.

18- Rénovation du tunnel.

19- Rénovation du tunnel : vue d'un rameau.

17- Gallery formwork.

18- Tunnel renovation.

19- Tunnel renovation: view of a cross-passage.

Pour l'éclairage, une installation de type LED a été mise en place pour un meilleur confort des usagers et afin de réduire la consommation.

Un câble radio est installé dans la galerie pour permettre la communication des secours et les armoires électriques situées dans chaque rameau permettent une alimentation sécurisée de chaque tronçon du tunnel.

Les portes coupe-feu et les surpresseurs sont installés dans les rameaux pour permettre leur mise en sécurité en cas d'incendie dans le tunnel.

RÉNOVATION DU TUNNEL

Une période de fermeture du tunnel routier est prévue dans le marché pour une durée d'environ 6 mois à partir du 18 avril 2017 afin d'effectuer une rénovation complète de celui-ci.

La durée du planning, restreinte par rapport à l'importance des travaux, est définie afin d'éviter la période hivernale qui s'échelonne du 15 novembre au 15 avril.

Travaux anticipés et période de préparation

En raison du très fort enjeu sur la planification des travaux, la période de préparation a été anticipée d'un an par l'entreprise.

Le maître d'ouvrage a également émis le souhait d'anticiper certains travaux et inspections : compléments d'inspection géologique, inspection topographique, busage des caniveaux dans le but de séparer les eaux de ruissellement et les eaux de lavage.

Cela a permis de préparer au mieux les travaux de rénovation.

Descriptif des travaux - méthodologie et planification

Un phasage journalier très précis a été élaboré par le groupement en collaboration avec la maîtrise d'œuvre mais également le coordinateur sécurité et les organismes de prévention. Cela afin de gérer aux mieux les co-activités puisqu'une dizaine d'ateliers sont amenés à travailler simultanément.

L'ensemble de travaux est planifié de l'ouest vers l'est afin de libérer des zones de travaux au plus tôt pour le revêtement en tôles et les travaux d'électricité et de ventilation.

Les travaux à réaliser sont dans l'ordre :

- Dépose des tôles existantes.
- Décapage de la roche.
- Passage des géologues afin de définir le soutènement à mettre en œuvre.
- Purge systématique. ▷



18
19

- Confortement par application du cahier de soutènement ; béton projeté et/ou ancrage de 3 m HA25. Cette phase constitue la sécurisation du tunnel, elle est prépondérante car aucune activité ne peut être commencée avant.
- Rescindement du rocher en piédroit et voûte suivant les profils existants, afin de créer des trottoirs de 65 cm (acheminement des usagers vers les rameaux ou la sortie en cas d'événement) et afin de rehausser le gabarit à 4,30 m de hauteur. Un rescindement est également effectué en base de piédroit pour la création d'un caniveau.
- Réalisation des caniveaux, trottoirs et regards de jonction.
- Excavation pour la création des nouvelles niches de sécurité aux dimensions réglementaires, en vis-à-vis (14 u au total, distantes de 200 m) et de 4 nouvelles niches incendie à proximité des nouveaux rameaux.
- Excavation par micro tirs à l'explosif pour la connexion des carneaux de désenfumage et l'insertion des gaines jusqu'à l'axe du tunnel en prolongation.
- Drainages des eaux et captage des sources importantes.
- Mise en œuvre d'un confinement en béton projeté de 5 cm sur l'en-

semble du rocher non revêtu afin d'achever la sécurisation à long terme du tunnel (environ 60 % du linéaire).

- Génie civil des niches et connexion rameaux et carneaux.
- Création de 32 nouvelles chambres BT de connexion sur la multitubulaire existante.
- Mise en place des tôles de revêtement en voûte.
- Mise en place des tôles de revêtement en piédroit avec des marquages pour la signalisation des niches de sécurité (couleur orange) et des rameaux d'évacuation (couleur verte).
- Installation des gaines de ventilation et des batteries d'accélérateur.
- Installation des liaisons de la colonne incendie entre la galerie et le tunnel pour permettre la mise en service de quatre niches incendie supplémentaires.
- Installation des chemins de câbles, éclairages, signalisations, vidéo-surveillance, capteurs, poste d'appel d'urgence et équipements de sécurité.
- Rabotage de la chaussée existante et application d'un enrobé clair (liant clair et granulats clairs). Ce souhait du maître d'ouvrage, associé à l'éclairage LED, génère une clarté optimale suivant l'atmosphère

extérieure (le système LED adapte l'éclairage suivant la luminosité extérieure). Cela engendre donc un plus grand confort pour les usagers du tunnel.

- Protection coupe-feu des fourreaux et de la chambre de tirage.
- Mise en route et essais unitaires et globaux. Cette période permet de tester tous les appareils et capteurs mis en place et de réaliser les scénarios notamment de désenfumage. La supervision vidéo, le système de détection automatique d'incident et la gestion à distance du maître d'ouvrage (PC Osiris situé à Albertville) sont également éprouvées.

Ce phasage de travaux s'est encore une fois déroulé 6 jours sur 7, et 24 h sur 24, afin de permettre la réouverture du tunnel dans les temps impartis (figures 18 et 19).

Dans la même période, les aménagements extérieurs comprenant les nouveaux réseaux, les bassins de rétention pour les eaux de lavage, les connexions des voies de circulation (piste cyclable et RD) et l'adaptation des signalisations ont été créés pour améliorer le confort des usagers.

Après 15 jours de marche à blanc dédiés à la prise en main par l'exploitant, le tunnel et la galerie ont pu rouvrir à la circulation le 18 novembre 2017, avant la période hivernale. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil département de Savoie
MAÎTRE D'ŒUVRE : groupement Systra (mandataire), Hgm, Hbi
COORDINATEUR SÉCURITÉ : Becs
GROUPEMENT D'ENTREPRISE : Eiffage Génie Civil (mandataire), Eiffage Route, Clemessy, Engie
BUREAU D'ÉTUDES : Bg Ingénieurs conseils

PRINCIPAUX INTERVENANTS

DÉBLAIS AU NIVEAU DES TÊTES : 15 000 m³
PAROI CLOUÉES : 200 m³ de béton et 11 000 kg d'ancrages de confortement

GALERIE DE SÉCURITÉ :

- 40 000 m³ d'excavation à l'explosif
- 25 000 m² de béton projeté de confinement
- 25 000 m² de membrane d'étanchéité
- 20 000 m³ de béton de revêtement C30/37
- 30 km de fourreaux
- 310 000 kg d'armatures
- 5 200 m² de revêtement en béton balayé
- 1 700 m de conduite incendie
- 1 600 m³ de béton multitubulaire
- 6 000 kg d'ancrages à action immédiate

RÉNOVATION DU TUNNEL :

- 25 000 m² de béton projeté de confinement
- 5 000 kg d'ancrages HA25
- 10 000 m² de tôles de revêtement en voûte
- 14 000 m² de tôles de revêtement en piédroit
- 1 060 t d'enrobé clair
- 14 accélérateurs

ABSTRACT

RETROFITTING OF THE CHAT TUNNEL

BENOIT CLARON, EIFFAGE - ARNAUD DELACOURT, EIFFAGE

In 2008, the Conseil Départemental de la Savoie started preparing the retrofitting operation on the Chat Tunnel, made compulsory by changes in the legislation following the fire in Mont Blanc Tunnel. In early 2015, this resulted in the start of the work programme entrusted to the consortium leader, Eiffage Génie Civil, to secure this 1,500-metre-long tunnel. The first two years were used for digging and lining a safety gallery parallel to the tunnel, dedicated to emergency aid and soft transport modes (pedestrians, cyclists). Then, between April and October 2017, a complete renovation of the road tunnel was carried out, including connections to the gallery for the evacuation of pedestrians and smoke control. □

ADECUACIÓN A LAS NORMAS DEL TÚNEL DEL CHAT

BENOIT CLARON, EIFFAGE - ARNAUD DELACOURT, EIFFAGE

En 2008, el Consejo Departamental de Saboya inició la preparación de la operación de adecuación a las normas del túnel del Chat, obligatoria en virtud de las modificaciones de la legislación tras el incendio ocurrido en el túnel del Mont Blanc. Esto se tradujo, a comienzos de 2015, por el lanzamiento de un programa de obras encargado a Eiffage Génie Civil, representante del consorcio de empresas participantes, para proteger este túnel de 1.500 m de longitud. Los dos primeros años se dedicaron a la perforación y el revestimiento de una galería de seguridad paralela al túnel, dedicada a las emergencias y al transporte no motorizado (peatones, ciclistas). Seguidamente, entre abril y octubre de 2017, se llevó a cabo una renovación completa del túnel viario, que incluía las conexiones con la galería para la evacuación de peatones y la extracción de humos. □

SMA



**Ensemble,
allons plus loin !**

L'assureur de toutes les entreprises,
des professionnels, des dirigeants,
de leurs salariés et de leurs proches.

Retrouvez tous nos produits d'assurance sur groupe-sma.fr




SMABTP
SMA L'AVANCE AVEC ASSURANCE

SMA **VIE**

SMA
ASSURANCES

SMA
COURTAGE

SMA **VIE**
COURTAGE



Travaux de génie civil du tronçon T2A, entre les gares
Villejuif, Louis-Aragon et Créteil l'Echat
Île-de-France, France
Grand Paris Express - Ligne 15 (Friche Arrighi)

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.

Soletanche
Bachy

Construire sur du solide

www.soletanche-bachy.com



SOLETANCHE BACHY