

**CHANTIER**

Saint-Martin-la-Porte

# Les ouvrages de reconnaissance de Saint-Martin-la-Porte préfigurent un projet hors norme

Le chantier des ouvrages de reconnaissance de Saint-Martin-la-Porte "SMP4" dans la vallée de la Maurienne en Savoie est le **seul chantier de travaux souterrains actuellement en cours** dans le cadre de la liaison ferroviaire Lyon-Turin depuis l'achèvement, côté italien, de l'excavation de la galerie de reconnaissance de La Maddalena à Chiomonte dans le Piémont (voir EES n°1 p. 4).

Le chantier est réalisé par un groupement d'entrepreneurs composé de 6 entreprises : Spie Batignolles TPCI (mandataire), Eiffage Génie Civil, Ghella, CMC di Ravenna, Cogeis et Sotrabas. Le montant global du marché s'élevé à 391 millions d'€ HT.

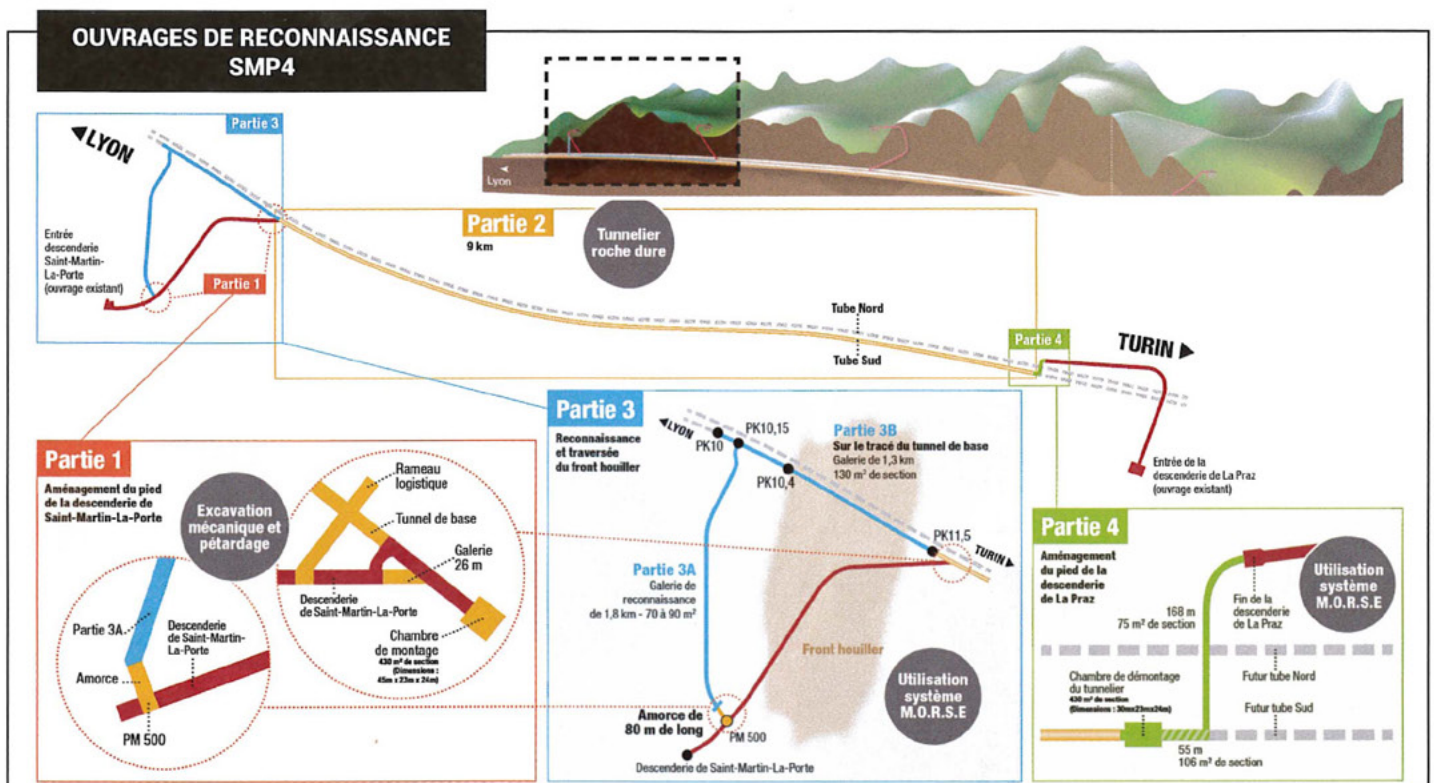
Le maître d'ouvrage est Tunnel Euralpin Lyon Turin (TELT). La maîtrise d'œuvre est assurée par Egis et Alpina.

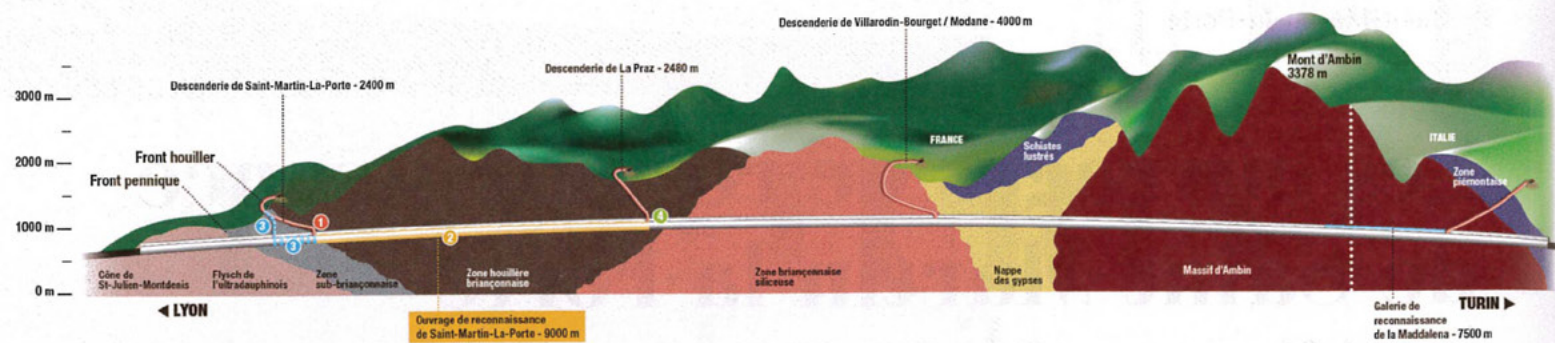
Comme leur nom l'indique, les ouvrages de reconnaissance ont pour fonction de (re)connaître le terrain à l'avant dans les zones les plus difficiles du projet. Les données recueillies seront utilisées pour affiner le projet et mettre en œuvre les solutions techniques les plus adéquates pour réaliser le futur tunnel de base bi-tube de 2 x 57,5 km.

TELT a divisé ce marché en 2 bons de commande couvrant la réa-

lisation des parties 1, 2, 3A, 3B (jusqu'au houiller productif) et 4 (voir ci-après).

Ces travaux démarrés début 2015 dureront 84 mois dont 50 mois pour le bon de commande n°1. Le bon de commande n°2 a été signé le 10 mai 2017 et couvre la partie 3B (autrement dit la traversée du front houiller). La fin du chantier est prévue pour fin 2021. A terme, quelque





12 kilomètres de tunnel auront alors été réalisés.

Près de 500 ouvriers et personnel d'encadrement, sous-traitants compris, ont été mobilisés en période de pic sur ce chantier, lequel fonctionne 7 jours/7 et 24 h/24.

Réalisés à partir de la descenderie existante de Saint-Martin-la-Porte, ces ouvrages de reconnaissance sont découpés en 4 grandes parties. La descenderie existante de Saint-Martin-la-Porte permet de rejoindre le niveau du futur tunnel de base. Au pied de cette descenderie existante, les travaux consistent donc, pour

l'essentiel, à réaliser une galerie de reconnaissance en direction de l'Italie jusqu'au pied de la descenderie de La Praz.

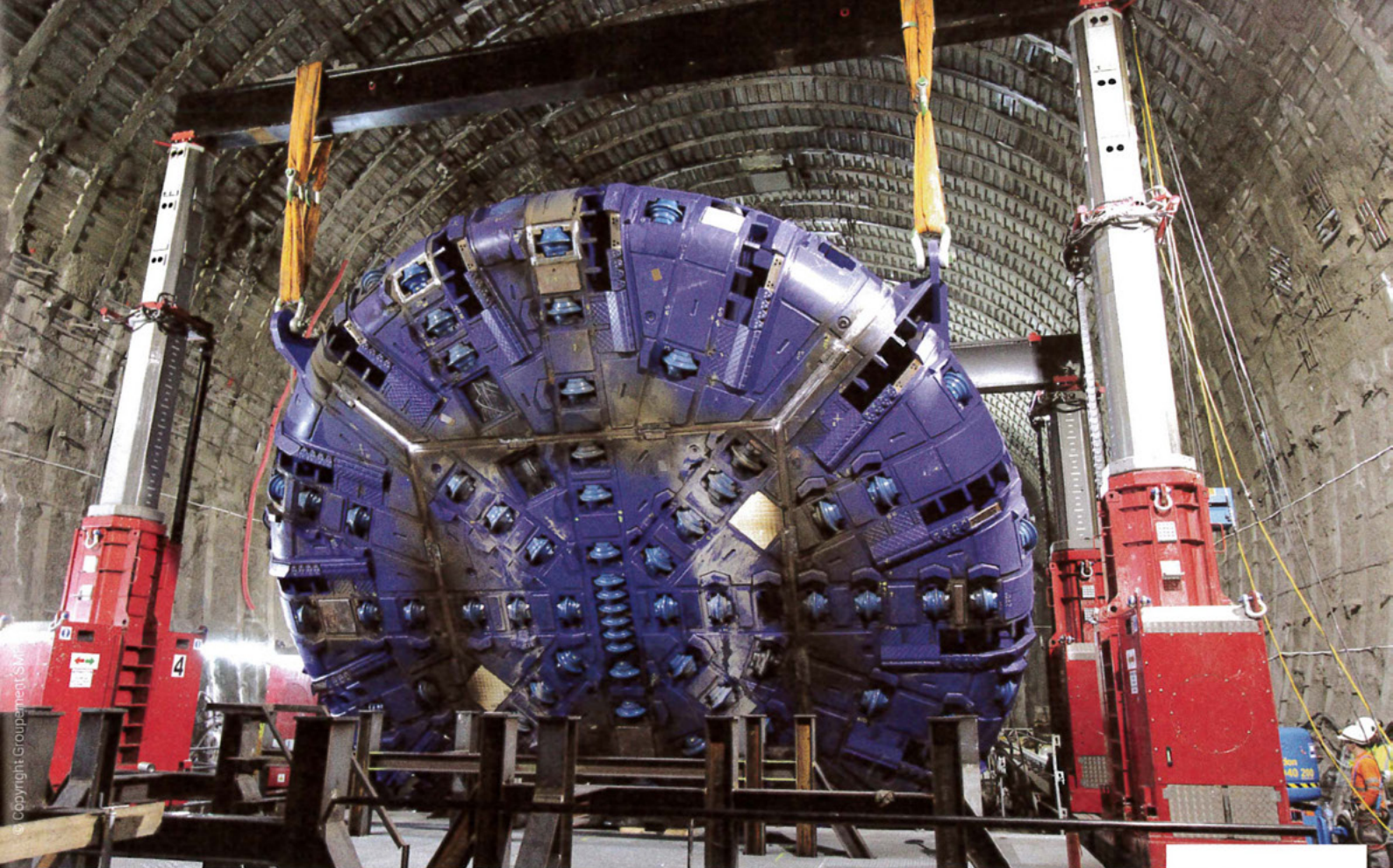
### Aménagement du pied de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte (partie 1)

La première partie des travaux a concerné l'aménagement du pied de la descenderie existante de Saint-Martin-la-Porte et s'est concentré sur la réalisation d'ouvrages logistiques réalisés à l'explosif :

- une amorce de 25 mètres de longueur, à 500 mètres de l'entrée de la descenderie existante, pour faciliter le démarrage de la galerie de reconnaissance complémentaire (partie 3A du projet, voir ci-après);
  - un rameau logistique pour permettre le passage de la bande transporteuse, nécessaire à l'évacuation des déblais du tunnelier;
  - une imposante chambre de montage du tunnelier de 45 mètres de longueur, 24 mètres de hauteur et 23 mètres de largeur.
- Ces travaux ont duré de janvier 2015 à mars 2016.

Ferrailage du radier de la chambre de montage du tunnelier.





*Tête de coupe du tunnelier en cours d'assemblage à l'intérieur de la chambre de montage.*

## **/// Galerie de reconnaissance au tunnelier roche dure (partie 2) dans l'axe et au diamètre du futur tube sud**

Le tunnelier roche dure de 11,26 mètres de diamètre, long de 138 mètres pour 1600 tonnes, a été réceptionné à l'usine NFM Technologies du Creusot le 14 janvier 2016 par TELT et le groupement d'entreprises. Après démontage et transport par convois (100 dont 34 exceptionnels) entre février et juillet 2016, le tunnelier a été réassemblé dans la chambre de montage creusée au pied de la descenderie. Baptisé "Federica", il a été inauguré le 21 juillet 2016 par l'ex premier ministre Manuel Valls, en présence de TELT et du groupement d'entreprises. Il excave depuis fin septembre 2016 la galerie de reconnaissance de 8700 mètres de la nouvelle liaison ferroviaire, en direction de l'Italie, pour aboutir au pied de la descenderie de La Praz.

La galerie est creusée dans l'axe du futur tube sud du tunnel de base et son diamètre intérieur est de 9,90 mètres une fois revêtue de ses anneaux. Le tracé suit plusieurs

courbes et contre-courbes dont le plus petit rayon est de 5 256 mètres. Le diamètre de creusement est adaptable et peut passer à 11,36 ou 11,46 mètres grâce à une procédure de changement de la taille des molettes périphériques sur la roue de coupe.

A partir du 6 décembre 2016, le tunnelier fut ralenti puis stoppé dans sa progression au contact d'une zone de roche déstructurée, voire broyée, constituée par des schistes noirs et des schistes charbonneux après avoir excavé 308 mètres. Ce type de géologie était connu et bien documenté depuis le creusement de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte "SMP1" et "SMP2" (2,4 km, pente de 8%), achevé en mai 2010, et sa rencontre avait été anticipée par des sondages en amont. Conçue pour progresser efficacement dans un terrain dur et homogène, la tête de coupe fracturait une roche dure jusqu'à ce que le terrain s'avère hétérogène. La matière se délitait et rendait l'excavation trop importante (phénomène de surexcavation). Au contact de ce front

totalemment déstructuré et fracturé, le tunnelier s'est "embourbé", utilisant trop de puissance et extrayant ponctuellement jusqu'à 15 fois plus de matériau que prévu.

Après analyse des échantillons de forage et des données fournies par la machine (puissance, couples, etc.), deux solutions techniques combinées furent alors choisies et mises en œuvre pour dépasser cette zone de faille carbonifère.

## **LES INTERVENANTS**

- ▶ **Maître d'ouvrage :** Tunnel Euralpin Lyon Turin
- ▶ **Maître d'œuvre :** Egis (France)/Alpina (Italie)
- ▶ **Groupement d'entreprises chargé des travaux de génie civil :** Spie Batignolles TPCI (mandataire, France), Eiffage Génie Civil (France), Ghella (Italie), CMC di Ravenna (Italie), Cogeis (Italie) et Sotrabas (France)
- ▶ **Fournisseur du tunnelier :** NFM Technologies (France)
- ▶ **Fournisseur des jumbos de foration :** Sandvik (Suède)



Cintres métalliques HEB à l'intérieur des anneaux de voussoirs.

La première phase a consisté à homogénéiser la roche en injectant de la mousse et des résines Mapei et BASF pour former un liant entre les matériaux déstructurés. Cela a redonné une cohésion et une tenue au terrain et limité son "écoulement" pour permettre au tunnelier d'avancer. Au total, ce sont 30 tonnes de résine qui ont été injectées.

La seconde phase a consisté à réduire les ouvertures des 16 bras de la tête de coupe afin de limiter la pénétration de matériau excavé à l'arrière de la roue de coupe, dotée de 70 molettes de 19 pouces.

La combinaison de ces actions a été concluante puisque cela a permis au tunnelier de repartir et d'éviter la persistance de son blocage en présence de cette difficulté géologique. A la mi-mars, les équipes ont commencé à entrevoir la fin de l'incident géologique. Il aura fallu deux mois et demi pour traverser l'accident géologique. La zone maintenant dépassée a été consolidée, au fur et à mesure de la progression de la machine, par l'installation de cintres métalliques HEB à l'intérieur des anneaux de voussoirs. Un érecteur de cintres est disponible sur le tunnelier et fait partie des spécifi-

cités de la machine. Il a été mis en œuvre par NFM Technologies.

Cette opération, intégrée dès la phase de conception de la machine, est rendue possible grâce à un espace de 30 centimètres laissé volontairement entre le voussoir et le gabarit des remorques du train suiveur tracté par le bouclier du tunnelier. Le cintre peut être rajouté si cela s'avère nécessaire. Une qualité de voussoirs beaucoup plus résistante a également été utilisée pour le revêtement de cette section délicate. En effet, pour le revêtement de la galerie de recon-

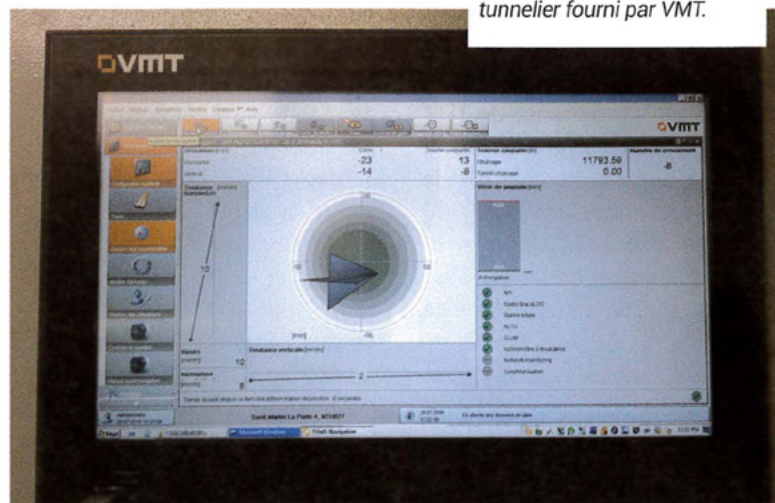
naissance de Saint-Martin-la-Porte, trois classes de résistance sont disponibles pour les voussoirs en fonction de la géologie et de la stabilité des terrains traversés.

Le tunnelier poursuit maintenant sa progression depuis mi-mai 2017 suivant le tracé de la galerie de reconnaissance jusqu'au pied de la descendrière de La Praz. Il progresse aujourd'hui à raison de 10 mètres/jour, avec des pics de 15-19 mètres. Au 11 juillet 2017, le tunnelier avait avancé de 885 mètres et posé 585 anneaux. On creuse légèrement en pente montante à 0,65 % sous couverture de 700 mètres au-dessus du tunnelier.

L'arrêt n'a pas impacté le planning des travaux.

Pour suivre l'axe théorique de la galerie, le tunnelier utilise un système de navigation TUNIS Navigation TBM<sup>laser</sup> fourni par VMT et il avance grâce à de puissants vérins (22 paires au total) qui prennent appui sur le dernier anneau posé et propulsent ainsi en avant la tête de coupe qui abat le terrain jusqu'à la course complète des vérins. Une fois ceux-ci complètement déployés, le cycle d'abattage s'interrompt pour permettre la pose des voussoirs à l'intérieur de la jupe, créant ainsi le soutènement et le revêtement étanche du tunnel.

Le système de navigation du tunnelier fourni par VMT.



Intérieur revêtu d'anneaux de voussoirs.

© Copyright Caroline Moureaux

En parallèle, les géologues continuent de sonder les sols à l'avant de la tête du tunnelier dans l'objectif de connaître, mètre par mètre, la nature, la lithologie et le degré de fracturation du terrain. Deux foreuses à l'avancement intégrées à la machine, placées à l'arrière de la motorisation, effectuent des sondages destructifs voire des carottages si nécessaire à un rythme dicté par l'avancement du tunnelier et les longueurs de sondages à réaliser pour étudier le terrain. Cela aide à dresser une cartographie de la géologie (auscultations, levés de front) tous les 15-20 mètres, partagée avec la maîtrise d'œuvre.

La dernière étape qui a clos l'incident géologique a consisté dans le remontage de la table à voussoirs, laquelle permet en temps normal de monter les voussoirs du tunnel d'une manière plus industrialisée.

## Solutions VMT pour la production, le stockage et la pose des voussoirs

Outre le système de navigation du tunnelier, VMT fournit également son produit SDS (Segment Documentation System), un système de gestion modulaire de l'assurance qualité et de la logistique gérant toute la production et les stocks de voussoirs. La supervision des voussoirs, de la production jusqu'à leur pose en tunnel, est essentielle pour assurer une qualité optimale et un avancement efficace. Le SDS saisit toutes les données importantes et prescrit des processus de travail qu'il contrôle ensuite. SDS agit alors en harmonie complète avec HADES et VDMS (successeur du produit IRIS), deux autres produits VMT, qui assurent un transfert de données généralisé et un accès aux informations dans le monde entier. SDS allie assurance qualité, documentation, gestion des stocks et procédure des commandes en un seul produit. Il fait économiser des ressources en termes de temps, de personnel et d'espace de stockage. Il assure une traçabilité par code-barres, une documentation sans faille ainsi qu'une planification de la production et de l'entreposage de tous les voussoirs, adaptées aux besoins du client, puis la planification de leur transport et intégration au tunnel.

L'interface avec le système de séquençage des anneaux TUNIS Ring Sequencing permet de déclencher des commandes de l'entrepôt depuis le tunnelier. Le système TUNIS Navigation Office fournit des données en temps réel sur la navigation du tunnelier et les anneaux, consultables depuis les bureaux de chantier, à bord du tunnelier, par serveur internet ou sur terminal mobile.

Enfin, le système SLuM Ultra de mesure automatique du gabarit dans la jupe améliore le processus de montage de l'anneau en mesurant la position de celui-ci par rapport à l'axe de la jupe au millimètre près. Afin de déterminer l'installation optimale de l'anneau, on observe la position actuelle et l'orientation du tunnelier ainsi que la position du dernier anneau posé. SLuM Ultra évalue automatiquement l'espace disponible dans le bouclier et optimise le processus de pose de l'anneau en interagissant avec le logiciel TUNIS Ring Sequencing.

La table de préhension vient de chez Acimex. Dès le début de l'incident, elle avait en effet été démontée pour permettre de poser les voussoirs de radier au plus près du bouclier. Chaque voussoir était transféré jusqu'à la zone de l'érecteur (de fabrication NFM) par un système de jeu de sangles qui permettait de translater les éléments les uns après les autres. Avec la table à voussoirs, l'ensemble de l'anneau est transposé tout entier, ce qui limite énormément le temps de déplacement dans le cycle. Un anneau est constitué de 7 voussoirs universels et 1 clé. Un voussoir de radier vient se poser en dernier sur la partie basse de l'anneau à des fins logistiques pour permettre la circulation aisée des trains sur pneus (TSP) par la suite. Il est muni d'un caniveau à fente permettant l'écoulement et la récupération des eaux d'exhaure et d'une réservation longitudinale pour les réseaux secs.

MS a livré une station de retraitement des eaux, lesquelles – une fois traitées – peuvent être rejetées propres dans l'Arc, la rivière qui fait face au chantier. Plus on va vers La Praz et plus on va trouver de l'eau. Fournie par FAMA, l'usine à voussoirs est implantée aux Cèillettes à environ 3 kilomètres de l'entrée de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte. Les 45 moules à voussoirs se déplacent de poste en poste à l'aide d'un carrousel. Au total, 90 voussoirs sont produits chaque jour par le consortium d'entreprises et 5 824 anneaux sont à fabriquer soit 52 416 voussoirs.

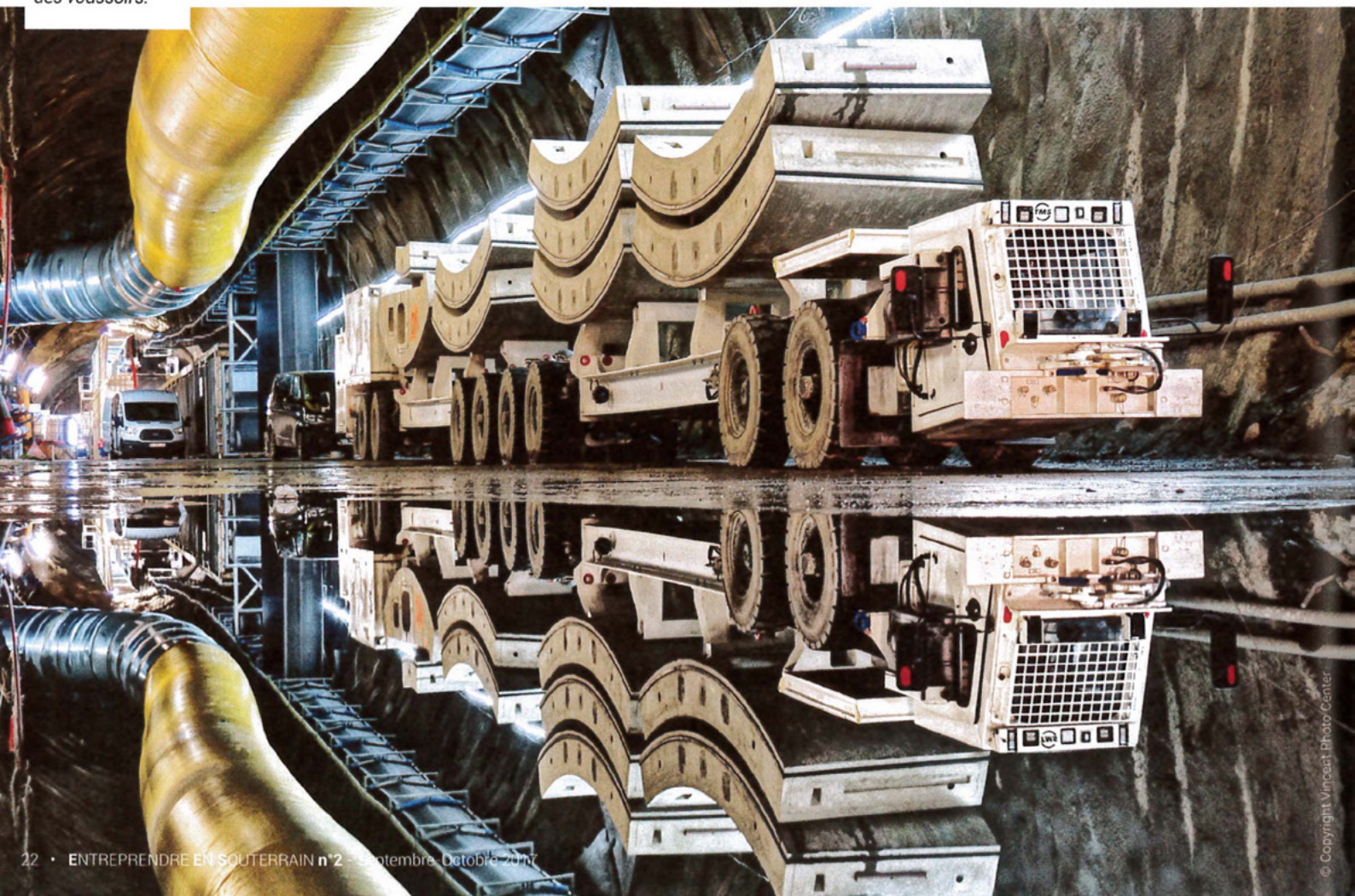
Les voussoirs sont acheminés par semi-remorques depuis l'usine de production et déchargés grâce à des ponts roulants GH pour être stockés dans 4 dépôts positionnés à proximité du chantier (2 définitifs et 2 provisoires). Pour alimenter le tunnelier au fur et à mesure de ses besoins, les voussoirs sont

ensuite rechargés en surface sur les VMS équipés d'un système de guidage avec caméra 3D placée aux extrémités du véhicule et capteurs ultra-sons. Cela fournit une aide à la conduite et au pilotage permettant au VMS de rester dans l'axe de la descenderie ou de progresser sans encombre, en cas de fumée épaisse, jusqu'au pied de la descenderie. Les voussoirs sont équipés de joints et connexions FAMA.

Le chantier compte 3 VMS pour transport des voussoirs, 1 TSP matériel, 1 VMS pour transport du personnel et 1 VMS de secours pour les pompiers avec chambre de survie, stocké dans le local pompiers SDIS 73 en surface, prêt en cas d'évacuation urgente. Tous sont fournis par TMS.

Des chambres de survie MineARC très profilées parsèmeront, tous les kilomètres, la galerie de reconnaissance. Leur faible encombrement (longues et peu larges) permet

Un des trois VMS fournis par TMS pour le transport des voussoirs.



Trois jumbos de foration Sandvik (modèles à trois bras DT920i) sont utilisés pour la partie à l'explosif de la galerie de reconnaissance de Saint-Martin-la-Porte.



© Copyright Vincent Photo Center

d'occuper le moins d'espace possible. Le tunnelier est aussi équipé d'une chambre de survie, d'une autonomie de 24 heures pour 20 personnes.

La ventilation du chantier est assurée par des ventilateurs Cogema-coustic et des gaines d'aération (SEMA pour la gaine souple et Bellet Industrie pour la gaine rigide).

Deux centrales à béton de la SATM (Société Auxiliaire de Transport et de Matériel, filiale de Vicat) sont installées à Plan des Saussaz, où se trouvent les installations de chantier, et à l'usine à voussoirs aux Ceillettes. L'une d'entre elles permet de produire un mortier bi-composant qui est injecté pour remplir le vide annulaire à l'extrados des anneaux de voussoirs. Entre 8 et 10 secondes de prise permettent d'obtenir une répartition homogène de la pression sur l'anneau plutôt que sur un côté de celui-ci uniquement et répartir ainsi les efforts liés au terrain.

Sur le pont supérieur du tunnelier se trouve une plateforme pour finir de remplir à la lance dans un 2<sup>nd</sup> temps, à partir de réserves, au travers de bouchons en caoutchouc sur les voussoirs.

### **/// Galerie de reconnaissance complémentaire et traversée du houiller à l'explosif (partie 3)**

Une partie des travaux se situe entre deux formations de roches composées de schistes, argilites, grès et charbon (front houiller et houiller productif). Cette géologie difficile rend le chantier particulièrement complexe car elle provoque de fortes convergences du terrain. Pour contourner cette zone, les travaux comprennent la réalisation d'une galerie complémentaire de 1,8 kilomètre à l'explosif (partie 3A), à l'ouest de la descenderie existante de Saint-Martin-la-Porte. Cette galerie suit une pente à 5,5 %

et des niches de sondage ont été réalisées pour sonder à 300 mètres dans la roche. Elles servent également de niches de retournement des engins.

Terminée en mai 2017, cette galerie de 70 à 90 m<sup>2</sup> de section a permis d'atteindre le 10<sup>ème</sup> kilomètre (PK 10) du tube sud du futur tunnel de base à partir du PM 500, autrement dit à 500 mètres depuis l'entrée de la descenderie existante (voir schéma).

À la mi-juillet 2017, à partir du fond de cette descenderie complémentaire, les équipes sont en train de creuser avec précaution, en section mixte (abattage mécanique et explosif), une seconde galerie de 1,4 kilomètre (partie 3B, voir schéma) en direction est vers la chambre de montage du tunnelier sise au pied de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte. Les équipes approchent du PK 10,5 et commencent à entrer de plus en plus dans le houiller productif. Cela va induire un changement de méthode

À bord du jumbo de foration Sandvik DT920i.



© Copyright Groupement SMP4

de creusement pour opter pour une excavation à l'attaque ponctuelle ou au BRH Liebherr.

La galerie permettra la reconnaissance et la consolidation des données géotechniques de cette zone. De nombreuses reconnaissances à l'avancement par sondages permettront d'identifier les types de roches et leurs caractéristiques géotechniques pour anticiper et adapter les méthodes de creusement et de soutènement. Pour affi-

ner ces prévisions, des sondages complémentaires sont effectués tous les 5 mètres.

Le creusement a eu lieu pendant 200 mètres en grande section de 130 m<sup>2</sup>, du PK 10,2 au PK 10,4 (voir schéma). Il se poursuivra ensuite dans la zone charbonneuse (l'unité du houiller productif) pour rejoindre le pied de la descendrière de Saint-Martin-la-Porte (PK 11,2 environ).

Les tirs de mine sont forés par 3 jum-

bos de foration Sandvik (modèles à trois bras DT920i) équipés du programme de gestion iSure® qui permet d'automatiser la phase de foration.

Les jumbos permettent d'effectuer des relevés (vitesse de foration, pression, etc.) qui recensent un maximum d'informations sur le terrain.

Après tir de mine, on évacue dans un 1<sup>er</sup> temps les déblais en surface au moyen de dumpers (le marché ayant été remporté par Technoscavi). L'acheminement des déblais vers les sites de dépôt extérieurs est assuré par Casarin. Puis on vient purger au BRH Liebherr le contour de la galerie pour sécuriser le front avant de boulonner grâce à une boulonneuse Robodrill automatisée à haut rendement.

La géologie difficile provoque de fortes convergences du terrain qui nécessitent la mise en œuvre d'un soutènement optimisé à base de cintres TH Jennmar, qui absorbent les convergences en fonction du mouvement du terrain.

Dans le soutènement souple (c'est-à-dire qu'on laisse le terrain converger à 10 mètres de diamètre), des

Chargeuse et dumper à l'œuvre dans la galerie de reconnaissance complémentaire (partie 3A).



© Copyright Groupement SMP4





Le système M.O.R.S.E® d'EPC France en action au front de taille de la galerie de reconnaissance de Saint-Martin-la-Porte.

cintres automatiques doublés munis de treillis soudé déjà posé dessus évitent les fastidieuses phases manuelles. De plus, les pieds se bloquent automatiquement, ce qui réduit le temps du cycle de production. Puis un peu plus en amont, un soutènement semi-rigide et un soutènement rigide sont mis en œuvre jusqu'à obtenir un gabarit de 7 mètres de diamètre intérieur. Du béton projeté fibré vient compléter le soutènement.

#### Aménagement du pied de la descenderie de La Praz (partie 4)

La partie 4 du projet a consisté à aménager en 2015-2016 le pied de la descenderie de La Praz. Deux ouvrages ont été réalisés à l'explosif :

- une galerie de liaison de 168 mètres et 75 m<sup>2</sup> de section permettant de relier le pied de la descenderie au tube sud du tunnel de base Lyon-Turin;
- au bout de cette galerie de liaison, une chambre de démontage de 30 mètres de longueur, 24 mètres de hauteur et 23 mètres de largeur, destinée à accueillir le tunnelier à la fin de son parcours de presque 9 kilomètres (partie 2).

## Le système M.O.R.S.E® d'EPC France

Le système M.O.R.S.E® (Module de Repompage et de Sensibilisation d'Emulsion) permet la production d'une émulsion explosive directement au front de taille et la mécanisation des opérations de chargement de l'émulsion. Mis au point par la société EPC France, il contribue à l'amélioration des conditions de sécurité (très forte réduction de la manipulation des produits pyrotechniques) et de sûreté (plus sécuritaire pour les équipes et répondant davantage aux autorisations de stockage) ainsi qu'à l'amélioration de la productivité (facilité de chargement, gain de temps) et à la réduction des coûts de minage (diminution du nombre de trous, suppression des ateliers de pré-charges, stockage des produits pyrotechniques sur site réduit à son strict minimum).

La technologie M.O.R.S.E® a déjà largement fait ses preuves par le passé, dont la première fois lors du creusement du tunnel routier des Grands Goulets en 2005-2007 dans la Drôme. Elle cumule depuis lors de nombreux chantiers de référence.

Deux unités M.O.R.S.E® ont été utilisées sur le chantier de Saint-Martin-la-Porte.

L'émulsion est un mélange de nitrate d'ammonium, de sodium ou de calcium en solution aqueuse avec une phase huile contenant des huiles minérales et un tensio-actif. Elle a la consistance d'un liquide pâteux translucide.

L'émulsion est livrée au chantier dans des GRV (Grands Réipients Vrac) de 1000 litres. Chaque GRV contient 1400 kg de matrice. Ces GRV sont stockés dans un local aménagé pour contenir environ 30 tonnes de matrice. On y gare le véhicule M.O.R.S.E® et toutes les pompes de réactifs et matrice. C'est un local qui est chauffé pour maintenir les produits au minimum à 15°C même en hiver.

L'unité M.O.R.S.E® est composée d'une cuve inox pour la matrice (contenance environ 1200 kg), de 3 réservoirs pour les réactifs et l'eau (capacité 135 litres), d'une pompe matrice et de 3 pompes type CAT pour les réactifs et l'eau.

La matrice (émulsion) est une matière comburante classée 5.1, pour la rendre explosive. On la mélange avec des réactifs qui ont pour rôle de créer des bulles d'air et baisser la densité initiale de la matrice. Les différentes pompes ont des débits variables afin de paramétrer la densité de l'explosif entre 0,95 et 1,20. À l'aide d'un automate, on programme la quantité par trou en fonction de son diamètre et de sa profondeur. L'opérateur qui est à front est équipé d'une télécommande qui lui permet de charger les trous en appuyant sur la télécommande : ainsi la quantité programmée est injectée dans le trou à travers un tuyau appelé canule. Le système s'arrête pour passer au trou suivant et une nouvelle impulsion de la télécommande.

Quand la géologie du terrain est favorable, la profondeur des volées est de l'ordre de 4,50 mètres et la quantité moyenne pour ces volées est d'environ 900 kg.

La quantité totale pour le chantier est de l'ordre de 650 tonnes pour les 2 attaques de Saint-Martin-la-Porte et La Praz.