

TITRE : Sécurisation du Tunnel ferroviaire de MEUDON : réalisation d'une galerie d'évacuation au Tunnelier

Co-Auteurs : Nicolas Kolodkine - responsable adjoint agence BESSAC Ile-de-France, Pierre Guerin - ingénieur GEOS, Yves Ménard - responsable agence BESSAC Ile-de-France.

Chapô : Située le long du tunnel ferroviaire de Meudon, la future galerie de secours de 3,50 m de diamètre intérieure et de 1 700 m de long, est destinée à l'évacuation des voyageurs du RER C en cas d'incendie. Des installations réduites et du matériel compact ont permis d'implanter un chantier de tunnelier accolé aux voies SNCF dans un environnement urbain très contraint. L'article présente les dispositions particulières retenues pour la conception et la réalisation de ce chantier au moyen d'un tunnelier à pression de terre, dans la zone d'influence du tunnel ferroviaire SNCF.

Résumé

Destiné à renforcer la sécurité du tunnel ferroviaire, la galerie de secours est un ouvrage de 1 700 m de long dont le diamètre intérieur est égal à 3,5 m. L'ouvrage creusé le long du tunnel existant (**figure 1**) permettra de faciliter l'évacuation des voyageurs en cas d'incident dans le tunnel de Meudon construit il y a plus de 100 ans. Réalisé à l'aide d'un tunnelier à pression de terre, le démarrage du creusement de la galerie a nécessité plusieurs dispositions spécifiques de conception et de réalisation présentées dans cet article.

Présentation générale du projet

Le tunnel de Meudon sur le RER C, situé entre les communes de Chaville et Meudon est un tunnel de 3 363 m datant de 1901 qui présente la particularité de n'avoir aucune issue de secours.

A la suite de l'incendie du tunnel du Mont Blanc en 1999, l'ensemble des tunnels ferroviaires et routiers français a fait l'objet d'un inventaire. Le tunnel de Meudon fait partie des tunnels à risques pour lesquels des travaux sont indispensables.

Les travaux ont pour objectif d'améliorer les conditions d'auto-évacuation des voyageurs en cas d'incident. Trois issues de secours sont en cours de réalisation (**figure 2**) :

- 2 issues constituées chacune d'un rameau de 30 m de longueur relié à une galerie réalisée au tunnelier sur 1 700 m,
- 1 issue constituée d'un rameau de 60 m de longueur relié à un puit de 8 m de diamètre et de 42 m de profondeur.

Ces travaux viennent en complément d'une première série de travaux comprenant :

- La réalisation de platelages pour faciliter le cheminement à pied dans le tunnel existant,
- Les amorces des rameaux (**figure 3**), c'est-à-dire le renforcement du tunnel existant et le creusement des rameaux sur une longueur de 5 m depuis le tunnel.

Contexte géotechnique et hydrogéologique

Le tunnel de Meudon relie d'Ouest en Est les communes de Chaville et de Meudon en passant sous le plateau de la forêt de Meudon. Celui-ci présente une topographie marquée avec un dénivelé de plus de 80 m entre le sommet du plateau et les zones urbaines en têtes de tunnel.

Du point de vue structural, les formations sédimentaires tertiaires rencontrées dans la zone du projet sont affectées par le pli anticlinal de Meudon, dont l'axe de direction approximatif Est-Ouest se trouve

à environ 2 km au Nord du projet. Le secteur étudié est relativement proche du dôme anticlinal, ce qui explique l'épaisseur significativement réduite de la plupart des couches. Celles-ci présentent une morphologie marquée de larges ondulations au long du tracé du tunnel et leur pendage global est estimé à 7% orienté vers le Sud dans cette zone (**figure 4**).

Contraintes particulières

La galerie de secours vient s'inscrire dans un contexte particulier dans plusieurs domaines :

- Profondeur de la galerie

La galerie se situe en grande partie sous une forte couverture liée au passage sous le plateau de la forêt de Meudon. En effet, la couverture faible au départ, atteint rapidement plus de 80 m. Lors du creusement du tunnel existant, un effondrement s'est produit dans la partie centrale dans une zone où les formations imperméables supportant la nappe des Sables de Fontainebleau étaient réduites au minimum avec une charge hydraulique maximale. Cet incident a généré un retard de plus d'un an sur la construction et a potentiellement perturbé les horizons traversés par le tunnelier dans ce secteur.

- Zone de départ du tunnelier

Dans un contexte urbain dense au niveau des têtes du tunnel existant, il n'a pas été simple de définir une zone de départ pour le tunnelier. Le choix s'est fixé sur l'emprise SNCF autour de la tête côté Chaville, et en particulier sur le talus au Sud des voies. Ce choix a conduit à mettre en œuvre toute une série de mesures de protection pour assurer la stabilité des nombreux avoisinants et garantir un démarrage du tunnelier dans de bonnes conditions.

- Environnement global du chantier

La zone d'installation de chantier se trouve dans une zone pavillonnaire en bordure de la forêt de Meudon ce qui a nécessité l'application de procédures particulières pour limiter les nuisances pour les riverains (mise en place d'écrans acoustiques, créneaux horaires spécifiques pour les camions...).

- Dispositions techniques spécifiques pour le démarrage du tunnel

Au niveau de la zone de démarrage du tunnel, les travaux préparatoires suivants (**figure 5**) ont été réalisés afin d'assurer la pérennité des ouvrages à créer ainsi que celles des ouvrages existants (tunnel du RER C, réseaux enterrés, bâtis voisins) :

- Ecrans de pieux tangents pour confiner les tassements liés au creusement au volume entre écrans.
- Ferrailage d'une partie des pieux qui ont servis de fondations à la dalle support de la zone de stockage des voussoirs et des déblais car il n'était pas possible de faire du stockage au-delà d' 1 T/m^2 au-dessus du tunnel existant.
- Injection de traitement des remblais entre les réseaux enterrés et la galerie au passage sous la rue Alexis Maneyrol pour limiter les déformations au niveau de ces réseaux.
- Paroi clouée pour réaliser la plateforme de démarrage du tunnelier.

Les techniques de soutènement mises en œuvre devaient s'adapter aux conditions du terrain mais aussi à l'environnement urbain dense : emprise à gabarit réduit, présence de réseaux et d'ouvrages sensibles.

→ Ecrans de pieux tangents

La zone de départ de la galerie se situe à proximité du tunnel existant (environ 5 m entre les nus des ouvrages), en partie dans des remblais dont les caractéristiques mécaniques sont faibles. Un écran en pieux tangents a donc été réalisé pour limiter l'influence du creusement de la galerie sur le tunnel existant et permettre au tunnelier de s'éloigner du tunnel existant. Les pieux ont un diamètre extérieur de 400 mm, et une profondeur de 10 m depuis le niveau de la plateforme.

Compte tenu de la faible emprise disponible pour les installations de chantier et de la limitation de la charge de stockage au-dessus du tunnel existant, il a été réalisé une dalle portée par une partie des pieux précédents. Cette dalle a la particularité de présenter une partie en console importante vers le tunnel existant (5m environ par rapport à l'axe des pieux les plus proches du tunnel).

→ Injection de traitement sous les réseaux

Plusieurs réseaux enterrés étaient présents sous la voirie traversée par la galerie de sécurité (électricité, eau potable, gaz, assainissement). Pour limiter les déformations induites par le passage du tunnelier sous la voirie, une série de forages équipés de tube à manchettes ont été forés afin d'injecter un coulis de ciment dans les matériaux situés entre les réseaux et la galerie. Les travaux s'effectuant sur la chaussée, et comme il était nécessaire de passer sous les réseaux, les forages ont été réalisés selon plusieurs inclinaisons afin de garantir le traitement optimal.

→ Paroi clouée

Une paroi clouée (**figure 6**) d'environ 8 m de hauteur et de 250 m² a été réalisée pour libérer un espace suffisant pour la plateforme de démarrage du tunnelier. Cette paroi est constituée de clous HA 32 d'environ 7 m de longueur sur la face Sud (longueur limitée par l'emprise SNCF) et de clous en HA 32 et fibres de verre de 15 m de longueur pour la face Est. Les clous en fibre de verre ont été réalisés pour la section interceptée par le tunnelier car ils ont une très bonne résistance en traction mais très peu de résistance au cisaillement (donc facilement détruits par la roue de coupe au fur et à mesure du creusement).

Un tunnel dans un mouchoir de poche

Les contraintes liées au site ont nécessité de trouver des solutions innovantes, tant dans la conception fonctionnelle et structurelle du tunnelier que dans la logistique du chantier.

Un coup d'œil sur l'emprise (**figure 7**) du site suffit pour comprendre les enjeux du chantier de construction de la galerie de secours du tunnel ferroviaire de Meudon.

Véritable mouchoir de poche, le site de lancement du tunnelier s'étend sur une parcelle de 1 370 m², bordée à l'Ouest par une forêt, au Sud par une rangée d'habitations et au Nord-Est par les voies ferrées de la ligne du RER C et le tunnel ferroviaire de Meudon.

« Difficile d'imaginer l'installation d'un tunnelier mécanisé dans ces conditions-là. Il a donc fallu trouver des solutions pour optimiser au mieux le faible espace disponible. Ce projet était un vrai défi technique car le site de démarrage du tunnelier était très exigu et fortement contraint », commente Gilles Broll, le directeur de travaux du projet.

Aussi, dès le stade de la conception, les équipements du tunnelier ont été prévus afin de permettre le démarrage du creusement depuis une tranchée ouverte de seulement 25 m de long et 8 m de large entre le talus de la paroi clouée à construire et la voie ferrée SNCF.

Issue de l'usine de fabrication de l'entreprise BESSAC, basée près de Toulouse, le tunnelier certifié « Origine France Garantie », a pu ainsi être démarré en 1 mois et demi après la livraison des pièces sur le chantier. Le tunnelier a été conçu pour démarrer en configuration courte avec la centrale hydraulique et l'enrouleur à câble Haute Tension à l'avant de la machine. Le phasage de réalisation de montage du tunnelier a été réglé au cordeau par les équipes travaux afin de permettre l'assemblage des différents éléments de la machine depuis la phase de démarrage avec une seule remorque jusqu'à la mise en œuvre de la configuration de creusement définitive.

Parmi les choix techniques qui ont permis de réduire de plus de 30 % la longueur totale du tunnelier (**figure 8**) (égale à 67 m), on relève le choix du constructeur de positionner le poste de pilotage à l'intérieur de la cabine de survie, le développement d'un système de rallongement des servitudes compact à l'arrière du train suiveur, l'utilisation d'un mortier bi-composant permettant entre autre d'optimiser le nombre de wagons du train de marinage et l'intégration du sas à personnel dans la structure du bouclier frontal du tunnelier. Le tunnelier a été conçu en éléments d'un poids maximal compatibles avec l'utilisation d'une grue de capacité maximale de 250 T.

L'ergonomie et les accès à l'intérieur du tunnelier, ont également été optimisés afin de permettre le logement de l'intégralité des équipements nécessaires au bon fonctionnement de la machine.

Un ensemble très compact a été installé afin d'optimiser l'occupation de l'espace disponible résiduel. En surface, le moindre m² de surface disponible a été utilisé par le chantier pour la création des zones de stockages des déblais et des voussoirs, l'installation des équipements annexes telles que la centrale de fabrication de mortier bi-composant, les cuves à air et autres ateliers mécaniques. Le choix du mortier bi-composant s'est aussi imposé pour ce projet afin de minimiser les emprises en surface pour l'installation de la centrale. Le stock de voussoirs sur le chantier est réduit à la production maximale journalière de 14 anneaux. La fosse à déblais présente un volume de 380 m³ soit l'équivalent d'une journée de creusement. Pour arriver à maintenir des cadences de creusement, il a donc fallu organiser au plus juste la logistique des camions d'approvisionnement et d'évacuations des déblais, tout en respectant les règles strictes de circulation imposées par la ville. La grue à tour desservant l'ensemble du site a été montée sur un massif de pieux à proximité de la zone de démarrage de la galerie pour faciliter le chargement / déchargement des bennes à déblais et les manœuvres d'approvisionnement en voussoirs, additifs, huiles, graisses et autres matériels de servitudes nécessaires au fonctionnement du tunnelier (**figure 9**).

L'autre enjeu majeur du projet concernait le maintien du bien-être des riverains et la limitation des nuisances environnementales pouvant découler de la réalisation des travaux sur le chantier, notamment en termes de bruits et de vibrations. Conformément à l'étude 'bruit' réalisée au début du projet, plusieurs dispositions ont été prises pour limiter au minimum les nuisances extérieures comme par exemple l'installation d'un écran acoustique de 4 m de haut et 60 m de long au niveau de la limite Est de la plateforme haute du chantier et l'arrêt complet du fonctionnement de la pelle, des camions et de la grue la nuit. Afin d'utiliser les engins dans les plages horaires dérangeant le moins possible les riverains, le groupement a retenu un fonctionnement du chantier pendant la réalisation du creusement à 2 postes de production du lundi au vendredi. En effet, un fonctionnement 24h/24 et 7J/7 aurait été incompatible avec les objectifs de limitation des nuisances compte tenu de la proximité des riverains et malgré toutes les dispositions envisagées et mises en œuvre (**figure 10**).

Aux grands maux les grands moyens

Le tracé du tunnel présentait au démarrage une courbe suivie d'une contre-courbe de façon à éloigner l'ouvrage à construire du tunnel ferroviaire construit à la fin du 19^{ème} siècle par assemblage de moellons. Après la phase de démarrage réalisée sur 35 mètres à l'abri de deux rangées de pieux sécants

séparant les deux tunnels, la trajectoire prévue en courbe n'a pas pu être respectée : le tunnelier a continué à forer en ligne droite et a commencé à plonger au-delà de la pente théorique du tunnel soit -3.5% avec un accroissement jusque -4,3 % sur quelques anneaux. Ce faisant, le tunnel en cours de réalisation s'est rapproché du tunnel ferroviaire existant jusqu'à une distance de 4,60 m entre la roue de coupe (au PM74) et l'extrados du tunnel ferroviaire.

Les solutions d'évitement classiques (rajout de vérin de poussée, utilisation de boue lourde pour 'alléger' le bouclier, utilisation d'outils racleurs surdimensionnés) n'ayant pas montré leur efficacité, il a donc été imaginé de mettre en œuvre une solution originale consistant à exercer une traction de plusieurs centaines de tonnes sur une partie du bouclier tout en poussant avec les vérins de la machine situés à l'opposé de façon à générer un couple de redressement important. Cette solution a été efficace et a permis de remettre le tunnelier sur la trajectoire appropriée.

Après prise en compte des caractéristiques du matériel disponible chez le prestataire pressenti pour son expérience en précontrainte et possédant des équipements rapidement disponibles (Freyssinet), et des espaces accessibles en tunnel, libres de servitudes/rails/gaine de ventilation/câbles d'alimentation, il est apparu que le seul endroit en tunnel susceptible d'accueillir les câbles de traction correspondait exactement à la zone du bouclier où il fallait exercer la traction soit en position horaire 2h.

Rapidement, le chantier et les bureaux d'études de Freyssinet et du constructeur Bessac ont convergé vers la solution innovante suivante :

- Mise en œuvre d'un faisceau de 19 torons et d'un vérin de traction HA400 de capacité 400 tonnes et de course 280 mm (**figure 11**)
- Fixation côté tympan du tunnel d'un chevêtre support de vérin HA400 sur le bâti de poussée d'origine de la machine
- Fixation à l'autre extrémité, côté bouclier d'un bloc d'ancrage EV-19 des câbles sur une des chapes de vérin d'articulation (**figure 12**)
- Mise en place du faisceau de câbles en tunnel entre le bouclier et le vérin de traction
- Elaboration d'une procédure pour 'piloter' le vérin de traction en étant en mesure d'exercer une traction constante tout en 'relâchant' le vérin de 200 mm entre chaque regrillage de façon à ce que le bouclier progresse dans le terrain en étant soumis à des efforts poussée/traction constants.
- Adaptation de l'érecteur permettant la pose de l'anneau de part et d'autre des câbles précontraints (**figure 13**)

Cette installation a été mise en œuvre sous trois semaines. Le système a ensuite prouvé son efficacité puisque la trajectoire a pu être infléchiée immédiatement dans la direction souhaitée.

L'assistance au creusement par le dispositif de traction a été maintenue pour la pose d'un total de 25 m de revêtement. Le système a ensuite été démonté et le tunnelier a repris son fonctionnement nominal.

Abandon de la chaudronnerie extérieure

Ces derniers mois, le tunnelier GAIA a creusé selon un rythme soutenu de 270 m/mois en moyenne. Le creusement de la galerie de secours devrait s'achever fin 2019, après 14 mois de creusement, quand le tunnelier atteindra le PM 1 700 du projet. La galerie de sécurité étant borgne, la chaudronnerie extérieure sera abandonnée en fond de galerie et, après démontage, les équipements du tunnelier seront évacués par la galerie construite.

Hormis la roue de coupe et le bouclier, l'intégralité des équipements du tunnelier va faire l'objet d'un démontage minutieux à l'aide d'outils spécifiquement commandés pour l'opération. Ce phasage a été intégré dès la conception du tunnelier par le bureau d'études du constructeur.

Une série de travaux préparatoires dans le tunnel est nécessaire pour faciliter le recul des remorques du train suiveur et leur évacuation en dehors de la galerie. Dans l'ordre du démontage, le groupement envisage la dépose de l'érecteur, de la vis et des tubes de vis, la récupération des armoires électriques, des groupes hydrauliques, le repli de la motorisation complète de la machine (roulement et moteurs), ainsi que les vérins de poussée et d'articulations.

Les éléments ainsi démontés sont ensuite restitués au fabricant qui pourra sans doute les réutiliser pour la remise en état d'un autre tunnelier aux caractéristiques approchantes.

Principaux intervenants :

Maître d'ouvrage : SNCF réseau

Maître d'œuvre : Ingérop Conseil et Ingénierie

Entreprise : Groupement d'entreprises Bessac / Chantiers Modernes Construction / Soletanche-Bachy France

Encadré

Caractéristiques principales du tunnelier :

Tunnelier à pression de terre type EPB

Diamètre de creusement : 4 280 mm

Longueur du bouclier : 9,50 m

Longueur du train suiveur : 57,50 m

Longueur totale du tunnelier : 67 m

Voussoirs : Type universel / longueur 1,3 m / 5 + 1

Couple maximal : 2 000 kN.m

Poussée totale : 16 000 kN

Pression de confinement : 4 bars

Mortier injection : type Bi-composant

Rayon de courbure mini. : R=250 m

Démontable depuis un tunnel borgne

Principales quantités

Longueur de la galerie : 1 690 m

Quantité de déblais : 24 500 m³

Emprise installation de chantier en surface : 1370 m²

Rameaux d'accès au tunnel existant : 2

Locaux techniques : 3