

TUNNEL FERROVIAIRE EN STRUCTURE SOL-PLAQUE D'ACIER ONDULÉE IMPERMÉABILISÉ AVEC UNE GÉOMEMBRANE EPDM EN ALGÉRIE

RAILWAY TUNNEL WITH SOIL-STEEL STRUCTURE WATERPROOFED WITH AN EPDM GEOMEMBRANE IN ALGERIA

O. BASAR¹, W. SAMOLEWSKI², P. TOMALA², A. CZEREPAK², B. AMAT³

1 ViaCon Kisan, Istanbul, Turquie

2 ViaCon Construction Sp. z o.o., Przemysłowa 6, 64-130 Rydzyna, Pologne

3 Firestone Building Products EMEA BV, Ikaroslaan 75, 1930 Zaventem, Belgique

RÉSUMÉ – La nouvelle ligne de chemin de fer reliant Birtouta à Zeralda en Algérie a nécessité la construction d'un tunnel de 180 mètres de long dans une région sismique. En septembre 2016 a été inauguré l'un des plus grands tunnels en plaques d'acier ondulées au monde. Le tunnel a un diamètre de 12 m et une hauteur de remblais sur structure de 7 m. L'entièreté du tunnel a été imperméabilisée avec une géomembrane EPDM (8.320 m²). La flexibilité et l'élasticité des géomembranes EPDM étaient essentielles pour s'adapter à la forme ondulée des plaques d'acier. Cet article présente la conception et l'installation de la superstructure du tunnel.

Mots-clés : Tunnel, plaque d'acier ondulée, géomembrane, EPDM, étanchéité.

ABSTRACT – To complete the new railway line in Algeria, connecting Birtouta to Zeralda, the construction of a 180m long, cut and cover tunnel through a seismic region was needed. And so, in September 2016 was inaugurated one of the biggest tunnels made of corrugated steel plates in the world. The tunnel has a diameter of 12 m and the maximum cover depth above the structure is around 7 m. The tunnel was made watertight using 8.320 m² of EPDM geomembrane that covers the entire structure. The flexibility and elasticity of the EPDM geomembrane was essential to allow the membrane to adapt to the corrugated shape of the steel plates. This paper presents the design and installation of the tunnel superstructure

Keywords: Tunnel, corrugated steel plates, geomembrane, EPDM, watertightness.

1. Introduction

Dans le but de décongestionner l'important trafic de la banlieue Ouest d'Alger, une nouvelle ligne ferroviaire de 21 km a été créée entre les villes de Birtouta et Zeralda. Avec une capacité de 50 000 passagers par jour, cette ligne électrifiée à double voie a nécessité la construction de 23 ouvrages d'art (ponts, tunnels, viaducs, etc.) L'un de ces ouvrages (le SH16) est un tunnel en tranchée couverte de 180 m de long, situé entre les kilomètres 10+700 et 10+880 de la nouvelle ligne. La superstructure du tunnel est une grande structure en acier galvanisé à chaud au profil circulaire, avec un diamètre interne de 12,02 m et des profils en biais aux deux extrémités. Les chevauchements des plaques d'acier et les boulons ont été étanchés à l'aide d'un mastic adhésif en polyuréthane. Le tunnel a été couvert en totalité avec une géomembrane EPDM étanche et une double couche de géotextile de protection. L'installation de la structure a débuté en décembre 2015 et la mise en service a eu lieu en septembre 2016.

Informations générales :

- Investisseur : République algérienne démocratique et populaire représentée par ANESRIF.
- Conception, supervision et montage : ViaCon Sp. z o.o. Pologne.
- Produits :
 - Structure en tôle d'acier ondulée de type SuperCor SC-94R.
 - Géomembrane EPDM : Firestone GeoGard EPDM 1,1 mm.
- Entrepreneur : Yapı Merkezi / Infrarail SPA.
- Montage : Yapı Merkezi.

Exigences et hypothèses de conception :

- Géométrie adaptée à une voie ferrée électrifiée à double voie avec un écartement de voie standard de 1435 mm et une distance de 4,0 m entre les axes.
- Actions sur les structures conformément à la norme EN 1991 (Eurocode 1).

- Hauteur de remblais : 6,71 m sous la route et 6,00 m dans les zones restantes.
- Remblayage : granulat compacté à 98 % de l'Optimum Proctor Normal ($\gamma = 24,10 \text{ kN/m}^3$ jusqu'à 2 m au-dessus de la structure et $\gamma < 20,30 \text{ kN/m}^3$ au-dessus de 2 m).
- L'effet sismique a été pris en considération comme accélération horizontale (AH = 0,4).
- Durée de vie considérée : 100 ans.
- Couches de protection contre la corrosion :
 - Revêtement en zinc d'une épaisseur conforme à la norme EN ISO 1461.
 - Surface interne peinte avec une peinture polyuréthane de 100 μm d'épaisseur.

Paramètres de la structure SuperCor SC-94R :

- Diamètre 12,02 m.
- Longueur inférieure 180,08 m.
- Longueur supérieur 138,62 m.
- Acier galvanisé à chaud S315MC.
- Épaisseur des plaques 8 mm.
- Ondulation 381 x 140 mm.
- Raccords boulonnés, 4 rangées de boulons de classe 10,9.

Les extrémités libres de la structure métallique ont été terminées avec un collier en béton armé, construit avec une face en acier et deux rangées de boulons d'ancrage.

Les raccords boulonnés à 4 rangées étaient une solution innovante. Cette solution était nécessaire compte-tenu des valeurs élevées des forces normales, induites par la grande épaisseur de remblais au-dessus de la structure (Fig.1).

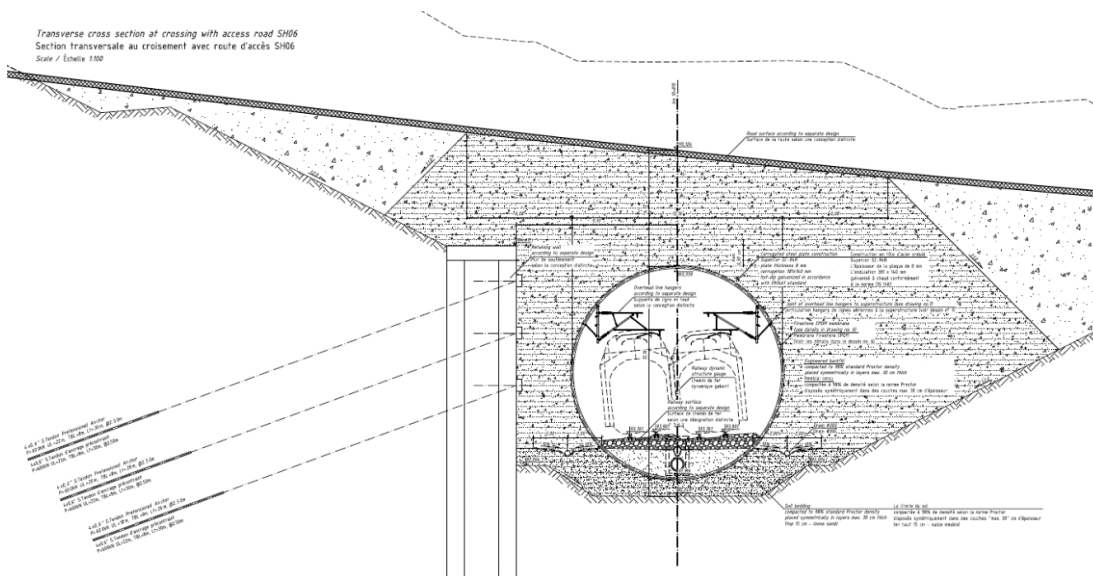


Figure 1. Coupe du tunnel

Le tunnel SH16 est situé dans un virage de la nouvelle ligne de chemin de fer et a dû, par conséquent, être divisé en quatre segments droits raccordés par des coudes soudés (Fig. 2).

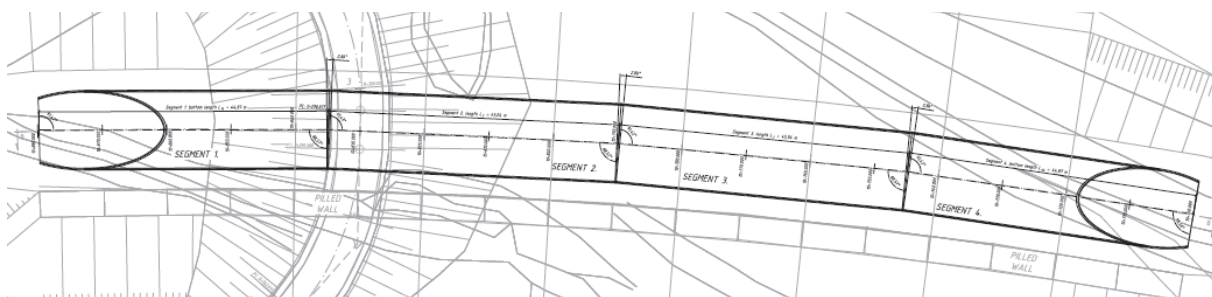


Figure 2. Vue de dessus du tunnel

2. Conception du projet

2.1 Calcul de la capacité portante

Les principaux calculs structurels de la construction en plaques d'acier ondulé ont été effectués en appliquant le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (dit CHBDC). Les charges ont été appliquées à la structure conformément à l'Eurocode 1. Les autres calculs structurels (collier en béton, système d'armement caténaire, etc.) ont été effectués selon les Eurocodes correspondants. Les calculs structurels, effectués conformément au CHBDC, incluaient :

- Etat limite ultime – destruction par déformation due à une compression axiale.
- Etat limite ultime – formation de rotule plastique durant la phase d'assemblage.
- Etat limite ultime – formation de rotule plastique durant la phase d'exploitation.
- Etat limite ultime – destruction de raccord boulonné.

La principale charge subie par la structure est constituée par le poids du remblai. Dans la zone située sous la route d'accès, la structure subit la charge du volume de trafic selon l'Eurocode LM1. Les conditions de sol et d'eau ont été qualifiées comme favorables à une fondation directe. Une couche de granulat a été dimensionnée pour la fondation. La fondation a été construite sur un sol perméable à l'eau – mélange sable-gravier de fraction 0-45 avec un coefficient d'uniformité $C_U > 4$, coefficient de courbure $1 < C_C < 3$ et un coefficient de perméabilité supérieur à 6 m/24 h.

Le granulat était exempt d'éléments organiques ou congelés. Le mélange sable-gravier était compacté conformément à l'indice de compactage minimum requis comme suit :

- $I_s \geq 0,95$ – jusqu'à 20 cm de distance de la structure ;
- $I_s \geq 0,98$ – dans la zone restante.

2.2 Système d'étanchéité à l'eau

L'étanchéité de la structure a été assurée par un double système d'étanchéité. La première barrière d'étanchéité est constituée par une géomembrane EPDM qui entoure étroitement la structure acier du tunnel. Les joints étanches entre les différents panneaux de géomembranes ont été réalisés à l'aide de bandes auto-adhésives en caoutchouc synthétique, selon les prescriptions du producteur. Un géotextile non-tissé aiguilleté de protection a été prévu des deux côtés de la géomembrane. Le second système d'étanchéité est constitué d'un mastic adhésif en polyuréthane appliqué le long des chevauchements des plaques en acier et sur les boulons. Pour étancher les boulons, le mastic est appliqué dans des capuchons en polyéthylène, dont la taille correspond à la tête des boulons et aux écrous.

2.2.1 Barrière d'étanchéité à l'eau par géomembrane EPDM

Les géomembranes EPDM sont un matériau élastomère utilisé dans l'ingénierie hydraulique (réserves d'eau artificielles, canaux, couvertures de décharges, etc.). Grâce à leur grande flexibilité et élasticité (supérieure à 300 %), elles s'adaptent parfaitement aux ondulations de la structure acier. Les géomembranes EPDM sont extrêmement durables (Noval et al., 2014), une caractéristique importante lorsqu'elles sont utilisées dans des infrastructures où la géomembrane est recouverte et ne peut être réparée ou remplacée. La grande largeur des panneaux (jusqu'à 15,25 m) et la simplicité du système d'assemblage sur site facilitent également le processus d'installation et de réparation. Ces avantages, combinés à la bonne résistance au poinçonnement (Noval et al., 2014), font des géomembranes EPDM des barrières d'étanchéité très efficaces pour les structures en plaques d'acier ondulées.

Aux deux extrémités du tunnel, leur flexibilité ont permis une connexion facile et étanche à la structure qui se termine en plan incliné.

Recommandations générales pour la géomembrane EPDM :

- Couche support : propre, lisse, compactée, exempte d'angles agressifs ou tranchants, de végétation, de pierres et de petites cavités.
- Structure acier : absence d'arêtes tranchantes et tous les boulons protégés par des bouchons en plastique.
- Protection de la géomembrane EPDM : géotextile de protection installé sur les deux faces.
- Installation de la géomembrane : installation lâche pour que la géomembrane s'adapte à la forme ondulée des plaques en acier.
- Assemblage de la géomembrane : processus d'assemblage selon les prescriptions du producteur avec QS Splice Tape et QuickPrime Plus. Lors de la réalisation d'un joint sur la

partie supérieure, la structure en acier étant ondulée, il est recommandé d'utiliser une planche sous la zone d'assemblage pour pouvoir appliquer une pression suffisante. La planche sera retirée par la suite. Le recouvrement entre deux géomembranes est de minimum 150 mm.

- Points triples : maximum 3 membranes en un seul point. Les points triples sont confirmés à l'aide d'une pièce de QuickSeam FormFlash (membrane EPDM semi-vulcanisée, colaminée à une bande adhésive). Afin d'augmenter sa résistance, le détail est recouvert d'une pièce de QuickSeam SA Flashing (membrane EPDM entièrement vulcanisée, colaminée à une bande adhésive). Cette pièce complémentaire, dépasse de la pièce inférieure de 75 mm dans toutes les directions. Ceci est destiné à augmenter la résistance mécanique du point triple. La même procédure est utilisée pour la pièce qui recouvre la jonction entre deux bandes de joint.
- Remblayage : le remblayage doit se faire de sorte que les géotextiles et la géomembrane soient lentement comprimés contre la structure en acier afin d'éviter d'endommager le complexe d'étanchéité.
- Dommages : tout dommage causé à la géomembrane doit être réparé immédiatement à l'aide de membrane EPDM entièrement vulcanisée, colaminée à une bande adhésive.

2.2.2 Essais et formation préalables à l'utilisation de la géomembrane EPDM

Avant de proposer la géomembrane EPDM comme solution pour ce projet, un essai de performance a été réalisé (Fig. 3). Un petit tunnel en tôle d'acier ondulée a été recouvert d'un géotextile de protection (300 g/m²), puis d'une couche de géomembrane EPDM. En face supérieure, un géotextile de protection a été installé seulement sur une partie de la structure tandis que l'autre partie restait sans protection supérieure. L'ensemble de la structure a ensuite été remblayé avec de la terre, compactée couche par couche, comme on le ferait sur un chantier réel. L'installation a ensuite été irriguée pendant 24 heures. Aucune fuite n'a été détectée.



Figure 3. Essais préliminaires

Convaincus par les résultats de l'essai de performance, une formation spécifique a été organisée avec le producteur et l'installateur/concepteur pour définir l'ensemble des détails à réaliser (Fig. 4).



Figure 4. Formation spécifique de l'équipe d'installation

2.2.3 Conception du système d'étanchéité par géomembrane EPDM

En raison de la taille importante du tunnel et du phasage du projet, il a été prévu d'installer la géomembrane en deux parties. Une partie inférieure et une partie supérieure reliées entre elles par un joint situé à la base du tunnel (Fig. 6).

La partie inférieure doit être installée en premier. Elle couvre la base de la structure et dépasse horizontalement sur les côtés (4,0 m de chaque côté) afin de créer une base imperméable pour les 2 tuyaux de drainage. 12 panneaux de 9,15 m x 30,5 m seront installés dans le sens de la longueur avec un joint au milieu (Fig. 5).

Pour la partie supérieure, 10 panneaux de 15,25 m x 30,5 m et 1 panneau de 7,62 m x 30,5 m seront installés dans le sens transversal pour faciliter le processus d'installation (Fig. 6).

Au total, 8320 m² de géomembrane EPDM et 965 m de joints sont prévus.

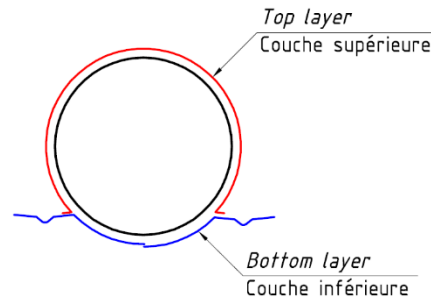


Figure 5. Coupe du plan de calepinage de la géomembrane

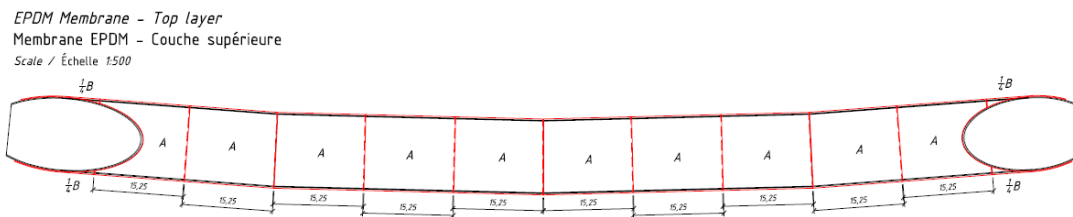


Figure 6. Vue de dessus du plan de calepinage de la partie supérieure

2.2.4 Mastic adhésif en polyuréthane

Le second élément du système d'étanchéité consiste en un mastic adhésif en polyuréthane à plasticité permanente, appliqué le long des chevauchements des plaques d'acier (Fig. 7) et sur les boulons protégés par des bouchons en polyéthylène dont la taille est adaptée à la forme des têtes de boulons et des écrous (Fig. 7).



Figure 7. Chevauchements des plaques d'acier et des bouchons remplis de mastic en polyuréthane

2.3 Tuyaux de drainage

Deux tuyaux de drainage ont été prévus des deux côtés de la structure afin de drainer les eaux d'infiltration (Figs. 8 et 9). 4 m de géomembrane EPDM sont utilisés pour créer une base imperméable avec une pente de 10 % pour un meilleur drainage. Le choix s'est porté sur des tuyaux bicouches en PVC, de 300 mm de diamètre, avec une perforation sur les 220° supérieurs et une rigidité annulaire nominale de 8 kPa minimum. Les tuyaux de drainage seront ensuite recouverts de gravier et d'un géotextile de filtration pour empêcher le colmatage du système de drainage.

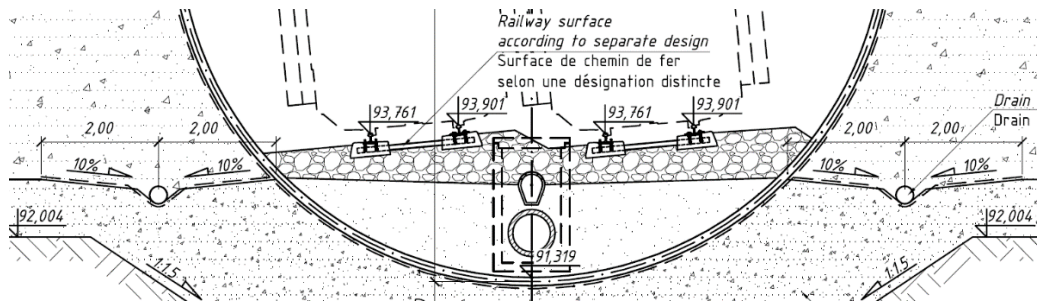


Figure 8. Emplacement des 2 tuyaux de drainage le long des deux côtés du tunnel



Figure 9. Tuyau de drainage le long du tunnel

3 Réalisation du projet

3.1 Installation et remblayage

La construction du tunnel a été réalisée selon les phases suivantes (voir les illustrations de l'installation dans la section 3.3) :

- 1) Construction d'un mur de soutènement en pieux sécants avec tendons d'ancrage précontraints, parallèlement à la tranchée d'excavation.
- 2) Excavation de la tranchée.
- 3) Mise en place et compactage de la fondation en graviers. Couches de 30 cm maximum et compactées à 98 % de l'Optimum Proctor Normal.
- 4) Mise en place d'une couche de 15 cm de sable meuble pour que l'ondulation des plaques d'acier s'y enfonce.
- 5) Mise en place de la partie inférieure de la géomembrane EPDM protégée par un géotextile de protection sur les deux faces.
- 6) En parallèle, préfabrication des segments inférieurs de la structure (assemblage de 8 plaques d'acier par segment).
- 7) Mise en place des segments inférieurs.
- 8) Assemblage continu des plaques de fond avec les plaques latérales et les plaques supérieures préfabriquées (sections de 5 plaques d'acier).
- 9) Assemblage des extrémités en plan incliné
- 10) Serrage des boulons, application du mastic adhésif en polyuréthane dans les chevauchements des plaques en acier et dans les bouchons des boulons.
- 11) Mise en place des tuyaux de drainage.
- 12) Mise en place de la partie supérieure de la géomembrane EPDM et assemblage avec la partie inférieure. Géotextile non tissé de protection placé sur les deux côtés de la géomembrane.
- 13) Remblayage avec vérification de l'indice de compactage. Couches de 30 cm maximum et compactées à 98 % de l'Optimum Proctor Normal.
- 14) Béton des colliers aux extrémités armé et coulé.

15) Installation des aménagements internes de la structure.

Les travaux d'assemblage ont été exécutés par des entreprises turques et algériennes sous la supervision constante d'un technicien polonais expérimenté. Il y a également eu une surveillance de la construction par les autorités compétentes. Le chantier a débuté en décembre 2015 et s'est terminé en mai 2016. Le chantier a été perturbé par des conditions climatiques difficiles qui ont provoqué l'inondation des fouilles à deux reprises. La vitesse du montage des plaques a été plus lente que prévue dans la première phase du chantier, en raison de la formation du personnel et du manque d'équipement. La première moitié de la structure était achevée après 4 mois de travaux, tandis qu'il n'a fallu que 2 mois pour terminer la deuxième moitié. La vitesse moyenne d'assemblage à la fin du processus était d'environ 30 plaques par jour. La mise en place de la géomembrane EPDM a duré 2 semaines avec 8 ouvriers et une grue. Des vents forts ont retardé la mise en place.

3.2 Contrôle des déformations

Des mesures géodésiques ont été réalisées tout au long du processus de remblayage. La déformation de la structure a été comparée au comportement de la structure prévu à l'aide de l'analyse FEM. Les mesures réelles étaient conformes aux estimations.

La figure 10 illustre les résultats des mesures du déplacement vertical du sommet de la structure pour l'une des sections contrôlées. On observe que le pic de déplacement vertical est obtenu au moment où le remblaiement atteint le sommet de la structure. On observe également le point où la structure s'enfonce dans le sable meuble.

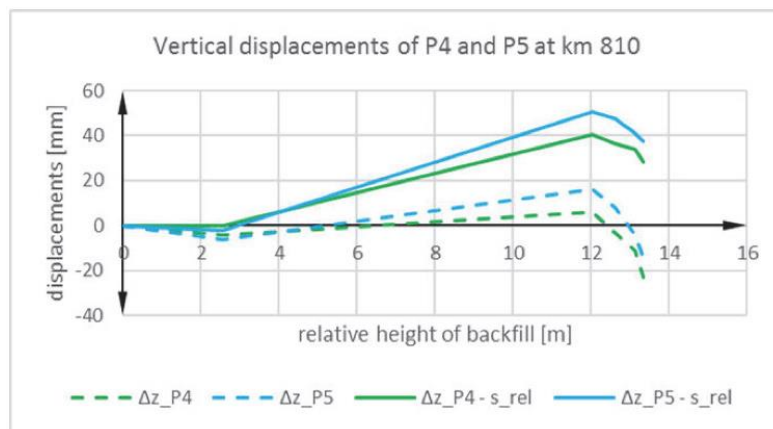


Figure 10. Déplacement vertical du sommet de la structure par rapport à la hauteur de remblaiement (lignes pointillées : tassement de la structure ; lignes continues : déplacements du sommet de la structure par rapport au fond de la structure).

3.3 Photos du chantier

Les figures 11 à 18 illustrent différentes étapes de la mise en œuvre du chantier.



Figure 11. Préparation du support et mise en place des géosynthétiques (partie inférieure)



Figure 12. Assemblage de la structure en acier ondulé par la méthode anneau par anneau

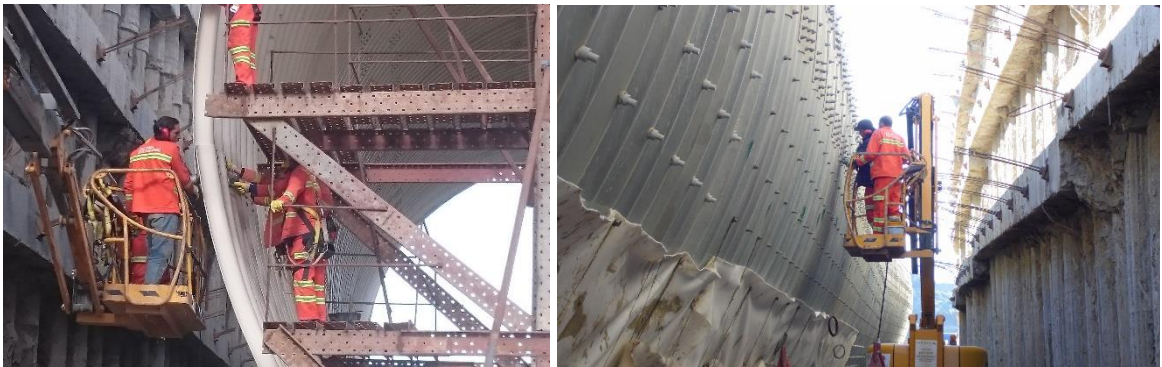


Figure 13. Serrage des boulons. Mur latéral du tunnel en pieux sécants stabilisé par des tendons d'ancrage précontraints



Figure 14. Structure en acier ondulé mise en place



Figure 15. Mise en place de la géomembrane EPDM sur le géotextile de protection (partie sup.)



Figure 16. Mise en place du géotextile de protection sur la géomembrane EPDM (partie sup.)



Figure 17. Différents éléments du chantier



Figure 18. Tunnel en service

4 Conclusions

La construction de la structure circulaire SuperCor du tunnel SH16 de la ligne de chemin de fer Birtouta – Sidi Abdallah –Zeralda peut être considérée comme une grande réussite. Il s'agit de l'un des plus grands tunnels en plaques de tôle d'acier ondulée au monde. L'utilisation d'une géomembrane EPDM

comme barrière d'étanchéité, s'est avérée être une solution très efficace grâce à sa flexibilité, son élasticité, sa rapidité d'installation et sa polyvalence.

Les entreprises impliquées ont acquis une grande expérience tant dans la conception que dans l'installation des structures en acier ondulé et des géomembranes EPDM, dans des conditions très différentes de celles rencontrées en Europe.

L'exploitation de la structure a débuté en septembre 2016. Cette nouvelle ligne de chemin de fer permet de décongestionner les banlieues à l'Ouest d'Alger et facilite l'accès au marché du travail d'Alger pour les populations des villes desservies.

5 Références bibliographiques

- Czerepak A., Zouhar J. (2012). Deformation control during assembly and backfilling of a corrugated steel structure, Ostrava, Czech Republic Archives of Institute of Civil Engineering No 12/2012 pp. 85-93.
- Kunecki B. (2014). Field test and three-dimensional numerical analysis of soil-steel tunnel during backfilling. Soil mechanics. Transportation Research Board of National Academies, Washington D.C. No 2462 pp. 55-60.
- Machelski C. (2009). Estimation of internal forces in the shell of soil-steel structures on the basis of its displacements during backfilling. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 1 pp. 19-38
- Machelski C., Michalski J.B., Janusz L. (2009). Deformation factors of buried corrugated structures. Journal of the Transportation Research Board. Solid Mechanics. Transportation Research Board of National Academies, Washington D.C. pp. 70-75
- Noval A. M., Blanco M., Farcas F., Aguiar E., Castillo F., Touze-Foltz N. (2014) Long-term performance of EPDM geomembrane in El Boqueron reservoir. *Geosynthetics International*, 2014, 21, No. 6 pp. 387-398
- Tomala P., Stachowicz Ł. (2017). Good practice in construction of flexible soil-steel structures. Well done installations of buried bridges. *Archives of institute of civil engineering* 23 p 269-278.
- Wadi A., Pettersson L., Karomi R. (2015). Flexible culverts in doping terrain: numerical solution of soil-steel loading effects. *Engineering Structures*, vol 101 pp. 111-124.