

AMÉLIORATION DE SOL D'UN REMBLAI DE CHEMIN DE FER EN CROATIE AVEC DES INJECTIONS DE RÉSINE URETEK GEOPLUS®

SOIL IMPROVEMENT OF A RAILWAY EMBANKMENT GROUND IN CROATIA WITH INJECTIONS OF URETEK GEOPLUS® RESIN

Maurizio SCHIAVO¹, Alberto PASQUETTO², Nicolas FAURE³

¹ *Sogen S.r.l., Padova, Italy*

² *Uretek Italia S.p.A., Bosco Chiesanuova, Italy*

³ *Uretek France, Serris, France*

RÉSUMÉ - Lors de la mise en place d'un gazoduc à travers un remblai de chemin de fer en Croatie, un tunnel a été percé à l'aide de la technologie HDD. L'insertion de la canalisation a provoqué des déformations excessives et continues. Pour augmenter la rigidité du remblai, des injections de résine Uretek Geoplus® à haute pression de gonflement, ont été réalisées sur la base des résultats d'une analyse 3D FEM.

ABSTRACT - Due to the placement of a gas pipeline through a railway embankment in Croatia, a tunnel drilling has been made using the HDD technology. The pipe inserting procedure caused excessive and continuous deformations. To increase the stiffness of the constitutive soil of the embankment, injections of high pressure expanding resin Uretek Geoplus® have been made, based on the results of a 3D FEM analysis.

1. Introduction

Au mois de mai 2010, la société URETEK a été contactée pour effectuer une intervention d'amélioration de sol, à l'aide d'injections de résine polyuréthane, sur un remblai ferroviaire à Rijeka (Croatie). Le projet prévoyait la réalisation d'un forage dirigé (technologie HDD) à travers le sous-sol et la compensation par cimentation (Pasquetto et al., 2008) à l'aide d'une résine polyuréthane, en prévention de déformations excessives. Plusieurs réunions ont eu lieu afin de définir le projet d'exécution intégrant les injections Uretek et obtenir les différentes autorisations d'intervention de la part de la compagnie des chemins de fer croates.

2. Contexte

Le remblai du chemin de fer, constitué d'un amoncellement de pierre, a été construit il y a environ 150 ans sur une pente orientée nord-sud. Ce remblai d'une hauteur de 13,0 m (au droit de la voie) se situe en lieu et place d'un ancien fossé. D'une longueur d'environ 30,0 m, il sert d'appui non seulement à la voie de chemin de fer mais aussi à 2 routes (une sur le côté nord de la voie ferrée et une autre côté sud).

Afin de mettre en place un gazoduc à travers le remblai, un tunnel de 650 mm de diamètre a été exécuté par forage souterrain, à l'aide de la technologie HDD (Horizontal Directional Drilling). Le 1er avril, après le forage du tunnel, pendant l'insertion de la canalisation, un glissement a été observé sous le chemin de fer, provoquant le blocage de tout l'équipement.

L'état de contrainte dans le remblai a entraîné, localement, d'importantes déformations se traduisant par un tassement continu de l'ordre de 5 cm/semaine. Celui-ci a dû être fréquemment compensé avec de nouveaux apports de pierre (Figure 1). Les rectangles en pointillé indiquent la zone de défaillance.

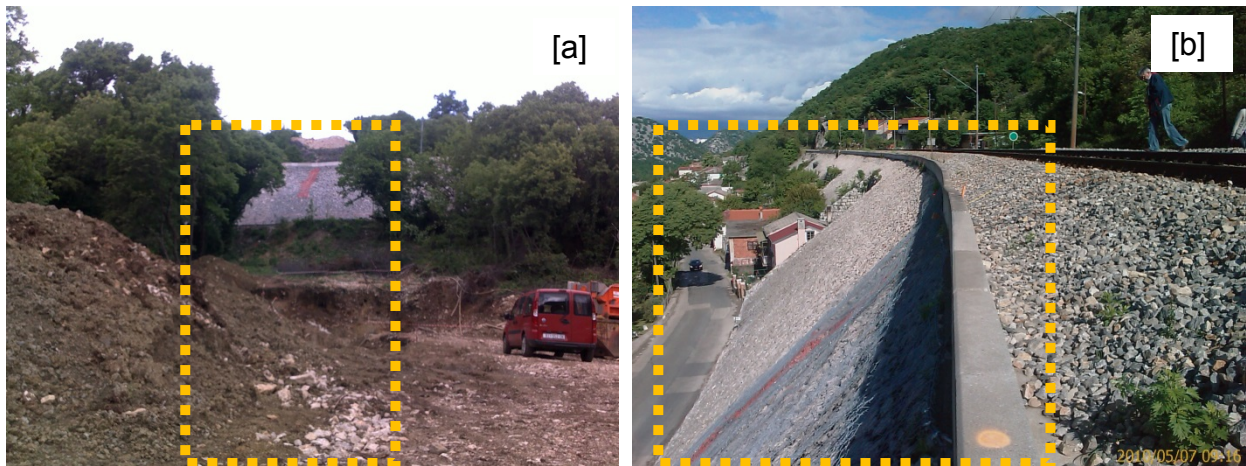


Figure 1. (a) Vue du Sud du talus du chemin de fer. (b) Talus du chemin de fer avec les dommages induits par le forage du pipe-line avant injections.

3. Compensation par cimentation à l'aide d'injections de résine polyuréthane

Les injections de résine polyuréthane, à haute pression de gonflement, sont fréquemment utilisées dans la stabilisation d'ouvrages fondés superficiellement tels que les routes, les remblais et les berges.

Le processus qui détermine l'amélioration des propriétés mécaniques du sol est très souvent difficile à modéliser du point de vue théorique, en raison de l'hétérogénéité intrinsèque du sol et de la propagation partiellement aléatoire de la résine.

Une bonne interprétation théorique du phénomène d'expansion de la résine est cependant essentielle à la bonne conception d'une intervention de compensation par cimentation. Le comportement de la résine lors de l'injection a donc été modélisé aussi bien du point de vue analytique (Yu et Houlsby, 1991) que numérique (analyse 3D aux éléments finis).

3.1. Méthode Uretek Deep Injections®

L'injection à une profondeur donnée d'une résine à haute pression expansion, Uretek Geoplus®, permet d'obtenir une amélioration notable des propriétés géotechniques du sol, induite par une compression radiale et une réduction de l'indice des vides par perméation.

La résine polyuréthane Uretek Geoplus® est obtenue par réaction chimique de deux composants, générant une expansion rapide du mélange (de l'ordre de 6 à 10 secondes) qui développe une pression de gonflement pouvant atteindre 10 MPa.

Pour établir ses principales caractéristiques mécaniques, la résine a été soumise à une série d'essais (mesure de la pression de gonflement, essais de résistances mécaniques, etc.) au laboratoire géotechnique de l'Université de Padoue. Les résultats présentés (Figure 2.a) montrent comment la résistance à la compression, σ_c , augmente rapidement avec le poids volumique, γ_r , de la résine.

Les essais ont également permis de préciser le module d'élasticité de la résine, E_r , avec des valeurs entre 15 MPa et 80 MPa, comparables aux modules caractéristiques $E_{50\%}$ et $E_{25\%}$ des sols alluvionnaires. Cela signifie que, dans un volume de sol exposé à des traitements à la résine, la raideur moyenne de la masse de sol injectée ne devient pas surabondante par rapport à celle du sol environnant.

Les valeurs de pression de gonflement mesurées lors des essais donnent un aperçu de la pression que la résine peut générer lorsqu'elle est injectée dans le sol (Figure 2.b). L'état de contrainte dans le sol détermine la pression de gonflement que peut produire la résine lorsqu'elle achève sa réaction de polymérisation. Le poids volumique final de la

résine et le degré d'expansion volumétrique mesuré à la fin du processus, sont donc tous deux fonction de cet état de contrainte.

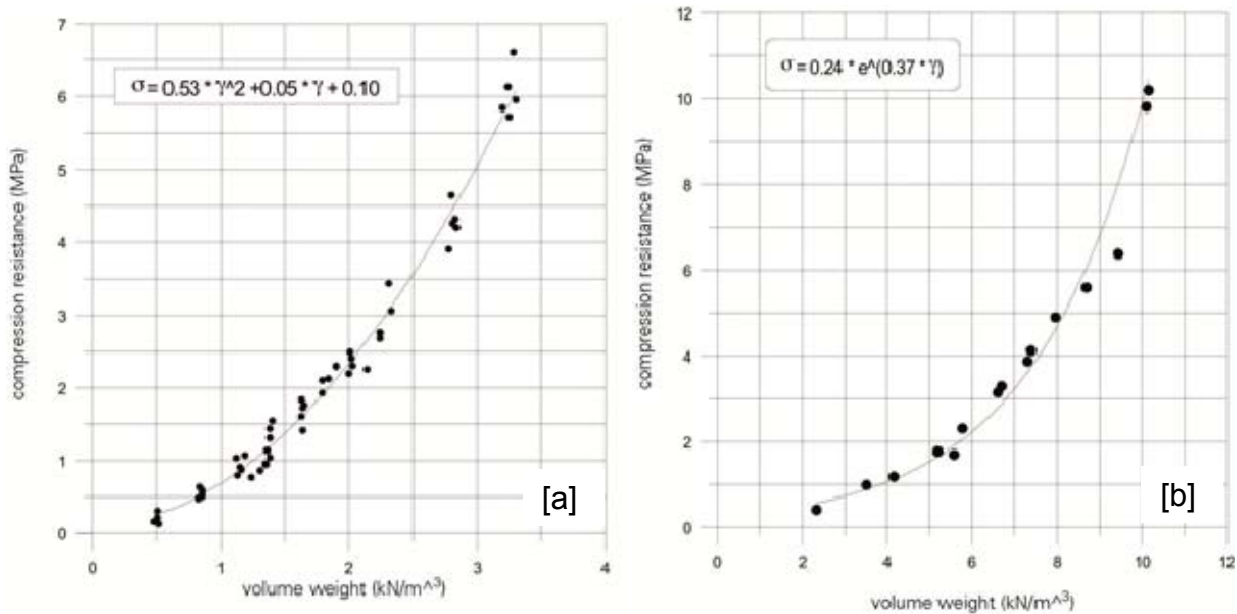


Figure 2. (a) Essais de résistance à la compression: évolution de la résistance à la compression, σ_c , avec le poids volumique, γ_r , de la résine. (b) Essais de gonflement: évolution de la pression de gonflement maximale, σ_{sw} , avec le poids volumique, γ_r , de la résine.

3.2. Approche théorique

Le processus d'expansion de la résine injectée dans le sol, est traité par la théorie de l'expansion d'une cavité de forme sphérique (ou cylindriques, si elle implique plus de deux injections à proximité les unes des autres et placées le long d'un axe vertical) dans des conditions quasi-statiques. Le sol est caractérisé par un comportement élastique parfaitement plastique et est soumis à un état de contrainte initiale anisotrope (K_0), avec une pression horizontale p_0 égale à :

$$p_0 = (1 + 2K_0) \cdot \sigma_{v_0} / 3 + dp \quad (1)$$

où K_0 , est le coefficient de pression latérale des terres au repos et dp , l'augmentation de pression moyenne induite par la charge existante et calculée à la profondeur d'injection z selon la théorie de Boussinesq. Les propriétés géométriques de la cavité comme des domaines élastiques et plastiques sont les suivantes (Figure 3):

- r_a : rayon de la cavité, la valeur initiale est supposée $r_{a0} = 0,006$ m;
- r_b : rayon de la zone plastique, il représente la frontière entre le domaine plastique et la zone élastique;
- r_c : rayon de la zone d'élasticité, la distance au-delà de laquelle $(\sigma_c - p_0) \leq 0,01 p_0$ (rayon d'influence de l'injection).

Dans la première partie du processus d'expansion, alors que la pression à l'intérieur de la cavité augmente, le sol reste dans le domaine élastique. Au-delà d'une certaine valeur de pression interne, des déformations plastiques apparaissent; durant le processus d'expansion, les zones élastiques et plastiques s'expansent jusqu'à ce que la pression limite (σ_{lim}) soit atteinte.

Le processus d'expansion est traité, du point de vue théorique, selon le modèle analytique présenté par Yu et Houlsby (1991); en optant pour une analyse aux grandes déformations dans la zone plastique et aux petites déformations dans la zone élastique.

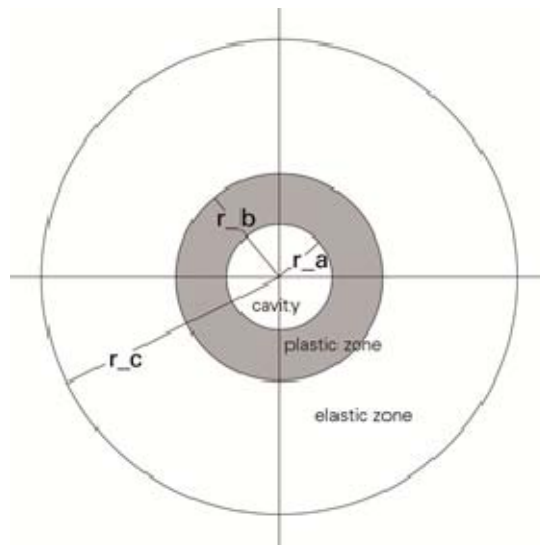


Figure 3. Représentation des zones plastiques et élastiques entourant la cavité.

3.3. Approche numérique

Une consolidation du remblai à l'aide de la méthode Uretex Deep Injections® a été étudiée après avoir analysé le volume du sol impacté par les travaux de forage du gazoduc. Une première phase a été étudiée par calcul analytique afin de préciser la section du pipeline où l'influence de l'excavation ne produit pas de déformations sensibles du trou de forage.

Après cette première phase, une seconde étude avec une approche 2D et une analyse préliminaire 3D aux éléments finis a été effectuée en utilisant, respectivement, le code source de la Phase2 (Rocscience Inc., Canada) et l'intégralité du code source 3D Midas GTS (Geotechnical and Tunnel analysis System – Midas IT Ltd, Japon), qui est basé sur un calcul aux éléments finis et une technologie graphique permettant d'effectuer des modèles géotechniques complexes.

3.3.1. Paramètres géotechniques des sols

Le remblai du chemin de fer a été construit avec des matériaux plus ou moins uniformes en pierre, plus précisément avec des blocs de forme irrégulière, de taille 5 à 20 cm, sans petites particules ni fines. Cette structure est caractérisée par une importante portion de vides. Selon les données recueillies lors des forages de reconnaissance et le retour d'expérience sur différents ouvrages similaires le long de la ligne Zagreb - Rijeka, l'indice des vides a été estimé à 35% environ dans la partie supérieure du remblai, et 30% dans la partie inférieure. Pour l'analyse, les paramètres suivants ont été utilisés :

$$\begin{aligned}c &= 0 \text{ kN/m}^2 \\ \varphi &= 35 \text{ degrés} \\ \gamma &= 20 \text{ kN/m}^3 \\ M_s &= 15\,000 \text{ kN/m}^2.\end{aligned}$$

Le sol naturel est constitué de deux types de matériaux: une couverture (couche d'altération et dépôts quaternaires) et le substratum rocheux (flysch en partie aval et roche calcaire en partie amont). Ces matériaux ont de bien meilleures propriétés physiques et mécaniques que celles du remblai de la voie ferrée. La résistance à la compression uniaxiale d'une roche calcaire altérée n'excède pas 50 MN/m^2 ; dans les zones moins altérées cette résistance peut atteindre 100 MN/m^2 . Les flyschs ont une résistance à la compression uniaxiale pouvant atteindre 470 kN/m^2 dans la couche superficielle et 1100

kN/m² en profondeur. Du point de vue hydrogéologique, les roches carbonatées ont une bonne perméabilité à l'eau, tandis que les flyschs sont presque imperméables. La couche de sol recouvrant les flyschs (sol rouge et débris avec fine couche de sédiments colluvionnaires quaternaires) sous le remblai de la route, peut être considérée comme partiellement perméable à l'eau. Dans le calcul, cette couche (à l'interface avec les flyschs) a été définie avec les paramètres suivants :

$$c = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi = 19 \text{ degrés}$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$M_s = 5\,000 \text{ kN/m}^2.$$

Les sols traités avec la résine Uretek Geoplus[®] ont vu augmenter leur résistance au niveau de la cohésion effective égale à 25 kPa (selon les formules indiquées sur la Figure 1a), mais pas au niveau de l'angle de frottement interne du sol en raison de la grande dimension des vides. Pour des raisons de sécurité, aucune modification du module d'élasticité du sol naturel n'a été intégrée dans le calcul.

3.3.2 Estimation simplifiée de l'anneau de consolidation

Afin de vérifier les dimensions de l'anneau de consolidation, un calcul préliminaire a été réalisé sur la base de cette simple hypothèse: le sol est un matériau isotrope dont le comportement suit la loi de Mohr-Coulomb avec une contrainte initiale isotrope et l'amélioration des sols est localisée entre deux cercles concentriques passant par l'axe du pipeline selon Yu et Houlsby (1991).

Afin de limiter le tassement vertical induit par le forage, l'anneau de matériaux traités doit être assez large pour maintenir le sol loin des conditions d'effondrement, ce qui peut être le cas si, autour du matériau traité, il existe une zone d'altération mécanique du sol naturel ou du remblai.

La géométrie et les caractéristiques du sol ont permis d'identifier la pression limite finale comme égale à 82 kPa. Par simple calcul, la pression radiale que le sol doit avoir en dehors des anneaux traités, afin de conserver un comportement élastique, est égale à 90 kPa avec un anneau de consolidation d'environ 2 m de large tout autour de l'excavation. À l'intérieur de l'anneau considéré, le sol développe un comportement plastique.

3.3.3. Approche bidimensionnelle (analyse 2D)

Afin de vérifier cette première estimation, une analyse en 2D a été effectuée pour vérifier les dimensions de l'anneau. Un modèle simplifié a été élaboré, et une surcharge égale à 40 kPa a été intégrée pour simuler les charges du chemin de fer.

Les principaux résultats du calcul sont représentés sur la Figure 4. La Figure 4(a) indique les principales contraintes de cisaillement autour du sol traité et près du tunnel. Comme nous pouvons l'observer, toutes les contraintes sont concentrées sur le haut, sur le bas de l'ouvrage, et en dehors de l'anneau traité (représenté par la ligne verte dans la figure). L'hypothèse de 2 m de zone à traiter autour du tunnel a été vérifiée. Sur la Figure 4(b), les principales contraintes radiales autour du sol traité et près du forage sont également présentées. Dans ce cas, nous pouvons observer que, tout autour de l'excavation, il y a une concentration de contraintes qui suggère une région plastique. En partie supérieure, la déformation plastique semble s'étendre jusqu'aux limites du sol traité mais la région externe semble conserver des conditions élastiques. Sur la partie inférieure, l'extension de l'action radiale n'atteint pas les limites de la zone traitée.

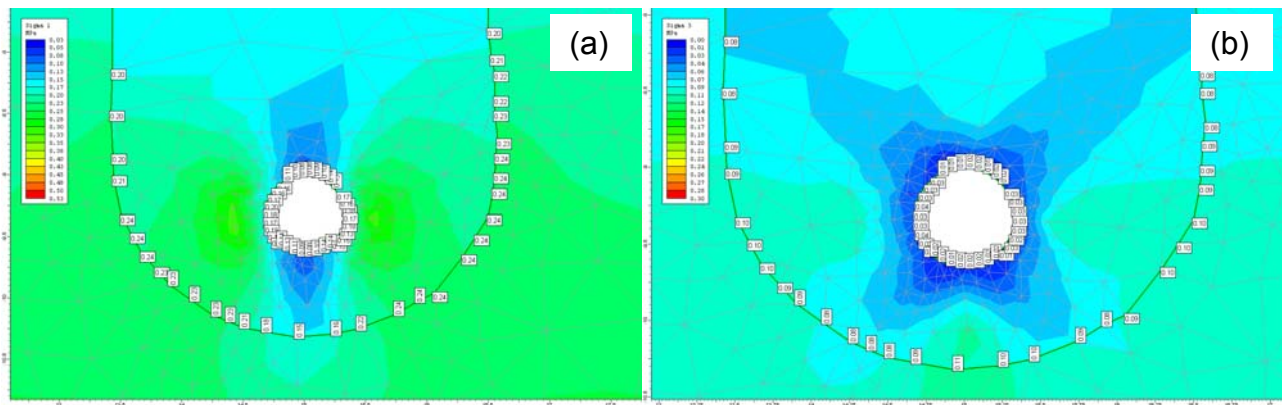


Figure 4. (a) principales contraintes de cisaillement autour du sol traité et près du forage.
(b) principales contraintes radiales autour du sol traité et près du forage.

Ces premiers résultats montrent que l'analyse simplifiée et l'analyse numérique donnent des résultats équivalents, qui confirment la fiabilité du calcul, tout autour de l'excavation, où il a été observé le développement d'une zone plastique. La zone plastique critique a été localisée à la périmétrie du forage tandis que la plastification ne semble pas s'être étendue au-delà de la zone traitée.

Le remblai semble rester en condition élastique en dehors de la zone traitée et le tassement maximum dans la partie supérieure de celui-ci apparaît acceptable. Ces tassements ont d'ailleurs été validés par les autorités ferroviaires.

Mais en raison de la géométrie complexe du problème et de la faible couverture de remblai au-dessus du pipeline, une analyse 3D est apparue nécessaire. Elle est présentée au point suivant.

3.3.4. Approche tridimensionnelle (analyse 3D)

Comme mentionné ci-dessus, une analyse 3D a été effectuée en intégrant certaines simplifications du problème afin de diminuer le temps de calcul réalisé avec une station de travail bi-Xeon. Pour accélérer le temps de calcul, le pipeline a été supposé linéaire et non incurvé, une hypothèse sécuritaire tendant à minimiser l'impact de l'épaisseur de la couverture du pipeline au niveau de la partie haute du remblai et près de la route existante. De plus, les sols traités ont été modélisés sous une forme rectangulaire et non curviligne. Aucun défaut ou interface n'a été simulé entre les éléments indépendants du sol, et le modèle était une extrusion de la section géotechnique passant par l'axe de la canalisation.

La figure 5 montre le bloc 3D du modèle en identifiant les différents types de sol, en fonction des paramètres géotechniques décrits ci-dessus, et le volume traité du remblai. La simulation a été effectuée avec une suppression progressive du sol autour de la construction du pipeline afin de simuler l'effet de serrage en front d'excavation et la convergence de l'ensemble du forage avec un pas de 2,0 m par phase. Toujours au niveau de la figure 5, nous pouvons également voir que la 2D peut être considérée comme représentative uniquement sur la ligne centrale du remblai existant avec le maximum de couverture, mais en raison de la géométrie du pipeline et de la pente du talus, une réduction progressive de la couverture réduit la zone élastique des sols.

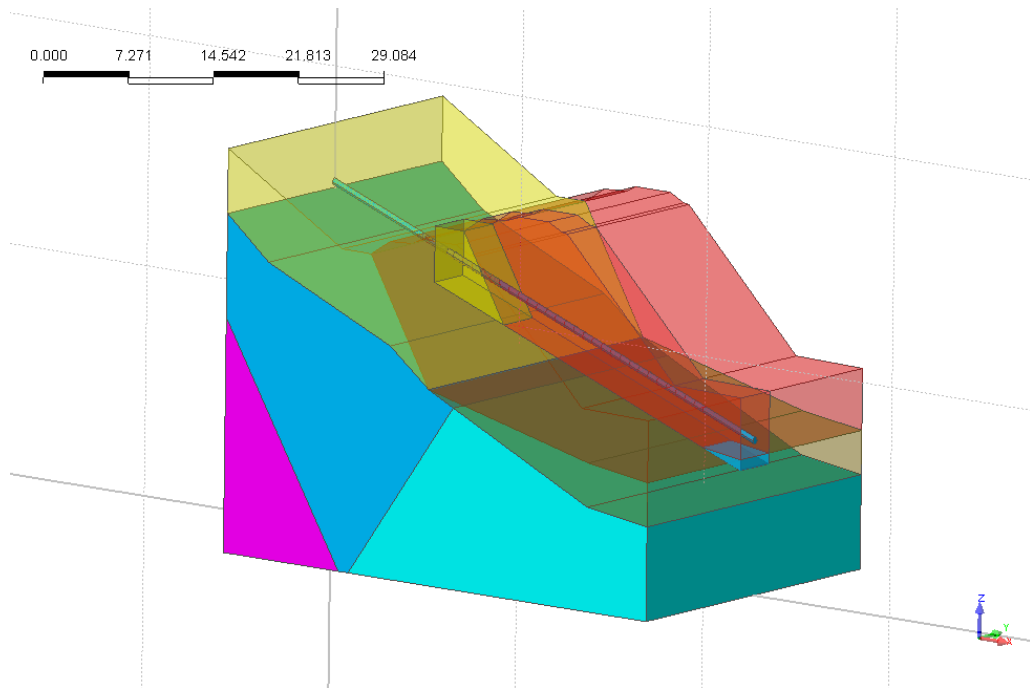


Figure 5. Géométrie du modèle 3D utilisé pour calcul.

Deux modèles ont été développés. La topologie de l'élément était linéaire avec 14 nœuds pour chaque élément et une fonction de maillage automatique a été utilisée pour augmenter le nombre d'éléments autour du gazoduc et des éléments moins denses ont été utilisés en dehors de la région du modèle intéressé par la consolidation.

Le premier modèle simule le comportement du remblai sans aucun type de consolidation ou zone traitée afin de réaliser un back analysis qui précise les défauts du remblai et permet de reproduire le tassement mesuré sur le site.

Au niveau de la figure 6 sont présentés les principaux résultats du calcul, en termes de déplacement global de la section de coupe passant par l'axe du pipeline et de déformation du sol dans la même phase.

Comme nous pouvons l'observer sur la Figure 6(a), au milieu de l'excavation, qui a été exécutée du bas vers le haut, la valeur calculée du tassement global du haut du remblai vaut 50 mm (sur le site, le tassement a été estimé à 70 mm) et après cette phase, le modèle s'effondre sans attendre l'excavation finale du pipeline. Sur la figure 6(b) nous pouvons observer que, dans cette phase, une surface potentielle de glissement peut apparaître sur le remblai près de la pente existante et également sur toute la plate-forme des voies ferrées. Plus en profondeur, une surface potentielle peut apparaître au niveau du contact entre le sol possédant de mauvaises caractéristiques géotechniques et le substratum rocheux sous-jacent.

Après le modèle en back analysis, un second modèle a été mis au point en imposant un traitement de consolidation avec les paramètres de sol modifiés comme décrit ci-dessus. En raison du mode de diffusion de la résine et du peu d'information concernant le remblai après le premier essai HDD, seule la cohésion effective a été changée dans le calcul précédent, avec une valeur sécuritaire de 25 kPa.

Dans ce scénario, la totalité du pipeline a été progressivement forée avec la même séquence du calcul que précédemment. La Figure 7 montre les principaux résultats du calcul. Sur la Figure 7(a) le tassement global est représenté, mais dans ce cas avec le pipeline totalement excavé. Un tassement maximal de 30 mm a été calculé, avec une réduction d'environ 25% par rapport au précédent, mais avec la totalité de l'excavation réalisée. Les résultats ont été influencés par l'affectation de paramètres sécuritaires de

conception. Près du gazoduc, une réduction du tassement liée au phénomène de convergence d'environ 10 mm a été calculée.

Plus important encore, simuler la condition de déformation indiquée sur la figure 7(b) où l'effet du traitement est plus pertinent. Comme nous pouvons l'observer, avec une excavation totale du pipeline, il subsiste la même faiblesse potentielle au niveau des couches des sols profonds (sous le remblai) mais, avec une réduction substantielle du risque de glissement sur la pente du talus, et une réduction globale des déformations près de la surface supérieure de la plate-forme du chemin de fer et ce, avec l'ensemble du pipeline excavé.

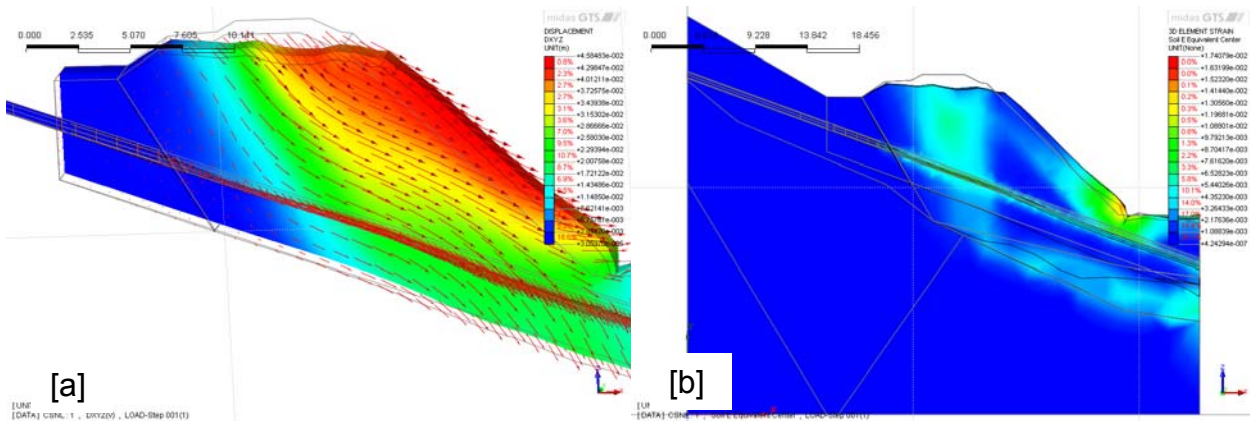


Figure 6. (a) tassement global du talus, (b) déformation globale des éléments de sol, sur un plan de coupe passant par l'axe médian du pipe-line.

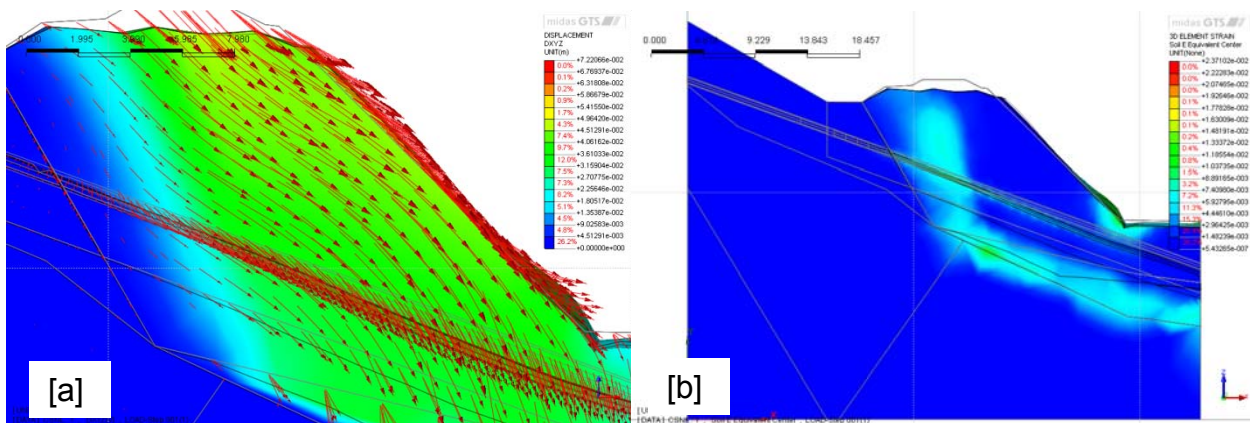


Figure 7. (a) tassement global du talus, (b) déformation globale des éléments de sol, sur un plan de coupe passant par l'axe médian du pipeline et avec le traitement de consolidation.

4. Projet d'intervention et exécution

4.1. Projet d'injection

Le but de l'intervention était d'augmenter la rigidité du sol constituant une partie du remblai à l'aide d'injections de résine expansive en vue de réduire les vides au sein dudit remblai.

La technologie, protégée par un brevet européen n° 0851064 propriété de Tur s.r.l. company, permet d'améliorer les paramètres du sol à l'aide d'injections de résine polyuréthane à très forte pression d'expansion.

Sur la Figure 8, le projet d'intervention est représenté: sur la première coupe avec le dimensionnement théorique pour une section donnée de l'anneau consolidé; sur la seconde coupe, la conception schématique de la position des points d'injection et du

positionnement relatif de l'amélioration. Enfin, sur la dernière coupe, une description schématique de la géologie aux environs du pipeline.

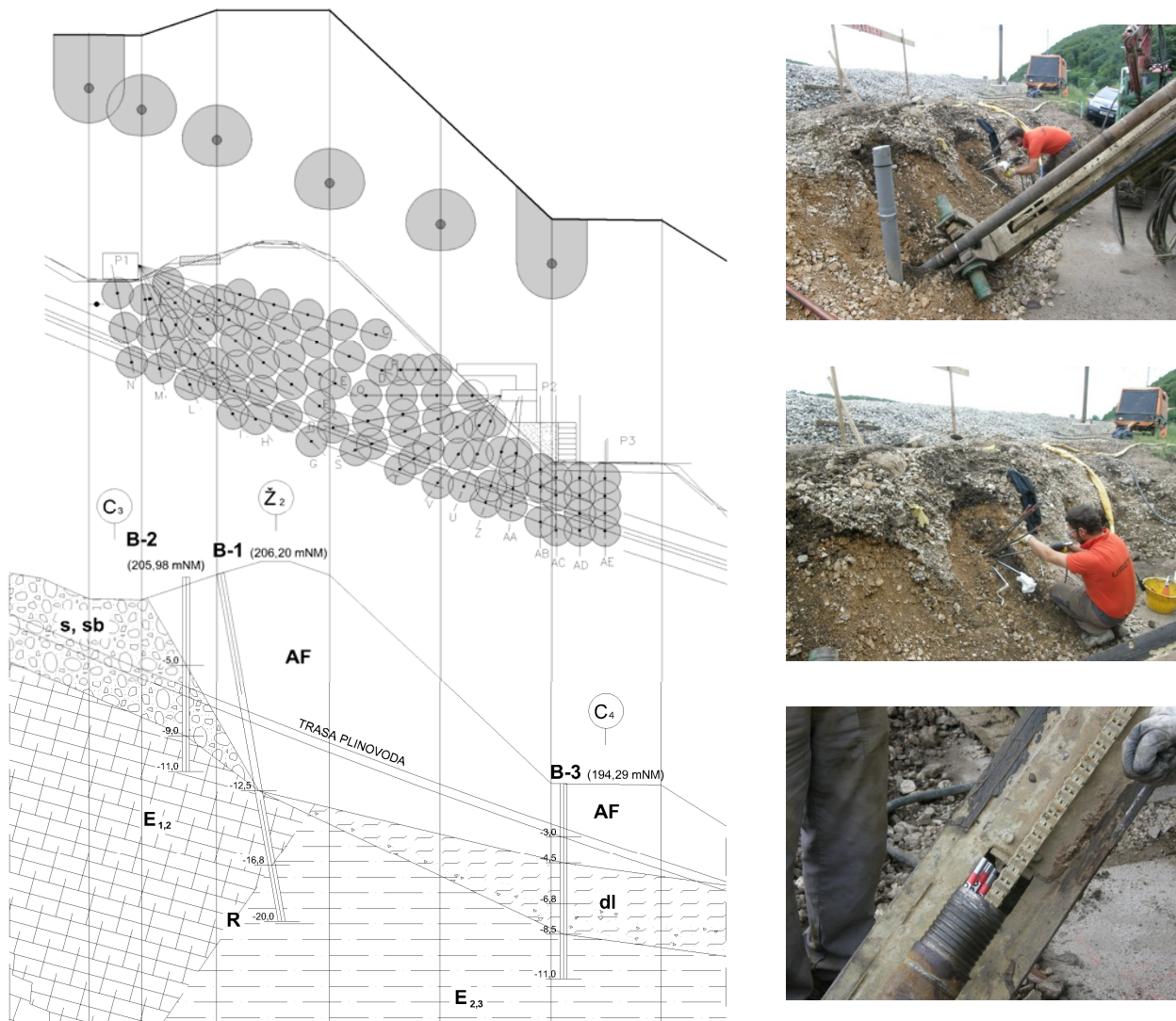


Figure 8. Représentation schématique des points d'injection, et de l'exécution.

4.2. Détails de l'exécution

Des tubes d'injection à usage unique de 12 mm chacun ont été positionnés à travers des forages tubés à l'avancement (diamètre 90 mm). Ainsi, il a été possible d'atteindre avec précision le sol devant être traité afin de concentrer les effets des injections.

La pose des tuyaux d'injection a été effectuée immédiatement après chaque forage. La phase d'injection, qui s'est déroulée à l'avancement des forages tubés, a été exécutée à l'aide d'un pistolet spécial directement connecté à la canne d'injection.

Les deux composants de la résine ont été injectés dans le sol déjà mélangés, après être passés dans une chambre de pré-mixage spéciale située à l'arrière du pistolet d'injection.

Le chef opérateur stoppa les injections dès lors qu'une augmentation soudaine de la pression d'injection apparaissait, ou lorsque le volume de résine injectée atteignait 40 l ou encore si le dispositif de surveillance mis en place signalait un quelconque mouvement. Les séquences d'injection étaient adaptées en cours de chantier en fonction des données obtenues lors des injections précédentes.

4.2.1. Données du projet

Pour ce chantier, un total de 12002 kg de résine a été injecté durant 12 jours de travail. Les injections ont été réalisées sans interruption sur l'ensemble du linéaire (week-end compris). Bien que deux jours aient été perdus au début de chantier en raison de problèmes d'organisation, la durée prévue des travaux a été respectée.

Volume traité	1 434 m ³
Nombre d'injections	414
Nombre de forages	126
Longueur des forages	805,56 m,
Résine injectée	12 002 kg.

4.2.2. Monitoring

Selon les données de surveillance, aucun tassement significatif n'a été relevé après les injections.

5. Conclusions

Au cours du mois de mai 2010, la société Uretek a été contactée pour effectuer une compensation par cimentation avec des injections de résine polyuréthane, pour éviter des déformations excessives sur un remblai de chemin de fer à Rijeka (Croatie), suite à l'exécution d'un forage dirigé à travers dudit remblai.

Le comportement de l'injection de résine a été modélisé tant du point de vue analytique (Yu et Houlsby, 1991) que numérique (analyse 3D aux éléments finis).

Le but de l'intervention était d'augmenter la rigidité du sol constituant le remblai, avec des injections de résine expansive ayant pour objectif de diminuer la portion de vides au sein du sol.

Durant le chantier, un total de 12002 kg de résine a été injecté en 12 jours. Et aucun tassement significatif n'a été enregistré pendant les opérations de forage du pipeline.

6. Références

- Dei Svaldi A., Favaretti M., Pasquetto A., Vinco G. (2005). Analytical modelling of the soil improvement by injections of high expansion pressure resin. Proceedings 6th International Conference on Ground Improvement Techniques, pp. 577-584.
- Gabassi M., Pasquetto A., Vinco G., Mansueto F. (2010). 3D FEM analysis of soil improving resin injections underneath a mediaeval tower in Italy. Proceedings 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering NUMGE, pp. 827-832.
- Pasquetto A., Gabassi M., Vinco G., Guerra C. (2008). Consolidation du sol par injection de résine polyuréthane, afin d'atténuer le gonflement et le retrait des sols argileux. Proceedings SEC 2008, Symposium international sécheresse et constructions, pp. 343-348.