

AMELIORATION DES SOLS PAR INCLUSIONS RIGIDES ET APPORT DES GEOSYNTHETIQUES

SOIL IMPROVEMENT BY RIGID INCLUSIONS AND ADDITION OF GEOSYNTHETICS

Thouna.Hamidechi Boulmaali ¹, Said Tabti ¹

¹ Afitex Algérie Alger- Algérie

RESUME :

Dans le cadre de la réalisation du projet Autoroute Est Ouest, lot Est sur 84 km tronçon (El Taref vers frontières tunisiennes), Le terrain du PK 397 +500 au PK 398+065 se caractérise par un sol compressible, plusieurs solutions proposées mais l'amélioration de sol par Inclusion Rigides associée à un géotextile de renforcement bidirectionnel est la mieux adaptée pour ce cas. Le nombre et /ou l'entraxe des pieux est le sujet de cette présentation ainsi que le type du géotextile de renforcement assurant le transfert des charges.

ABSTRACT

As part of the implementation of the East West Highway project, East lot over 84 km section (El Taref towards Tunisian borders), The land from PK 397 +500 to PK 398+065 is characterized by a compressible soil, several solutions proposed but the improvement of the soil by Inclusion Rigids associated with a bidirectional reinforcement geotextile is the best suited for this case. The number and/or spacing of the piles is the subject of this presentation as well as the type of reinforcement geotextile ensuring the transfer of loads.

1. INTRODUCTION

Le terrain de PK397+500 à PK398+065 est un sol compressible, il s'agit d'une couche épaisse d'argile marneuse (Profondeur maximale de 27 mètres), intercalée par des lentilles et des poches sableuse.

La dernière mesure du tassement de la plateforme a été effectuée le 16/04/2022 au niveau du PK397+500 sous le remblai d'essai de 11.23 m de hauteur a atteint 73.3 cm, dont 39 cm de tassement ont été produit durant la constitution du remblai, sachant que le tassement final estimé à 90 cm.

1.1. Topographie et géomorphologie

La zone où se trouve le pont est une zone de plaine, de relief plat et ouvert, avec une altitude comprise entre 23.05 et 24.51 m (fig.1).



Figure 1. Photographie de la plateforme à côté de OA 397.1

1.2. Lithologie de la strate

D'après le rapport de reconnaissance géologique établi par COJAAL [3], la zone présente la strate constituée, de haut en bas, de l'argile, le sable argileux, lâche-intense, et l'argile marneuse. Les diagrammes (1) et (2) sont des diagrammes en colonnes des sondages géologiques à proximité de la semelle de l'OA397 (fig.2).

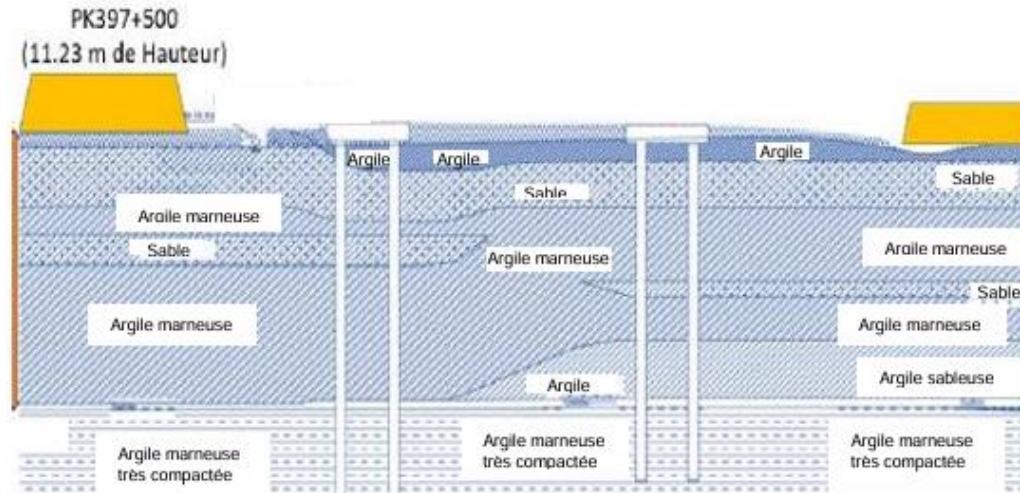


Figure 2. Schéma lithologique simplifié de la section PK397+700-398+065

2. LES VARIANTES DE CONFORTEMENT DE LA PLATEFORME ET LA SOLUTION ADÉQUATE

Deux variantes ont été présentées lors de la réunion du 14-7-2022 avec l'ensemble des intervenants (BCE, BCS, maître d'ouvrages et l'entreprise CITIC), la première solution avec le calcul du tassement pour estimer le temps de consolidation et la deuxième solution avec les inclusions rigides. Vu le délai de réalisation pour la première par consolidation tend vers des durées très importantes (plus de 18 mois dans le cas le plus favorable), le maître d'ouvrage a opté pour la solution des inclusions rigides qui consiste à transférer directement la charge due au remblai vers le substratum rigide de Marne compacte [2, 6]

2.1 Présentation des solutions

Dans ce schéma de fondation par inclusion rigide, l'espacement des pieux est ajusté à des fins de comparaison. Actuellement, il est déterminé que l'espacement des pieux de la variante 1 est de 6,0 m * 6,0 m, l'espacement des pieux de la variante 2 est de 7,0m * 7,0m (fig.3) ;

Une solution de renforcement mixte associant un réseau de pieux et un renfort en géosynthétique placé à la base du remblai sera adoptée. Les charges verticales dues au remblai sont transmises aux pieux directement par le sol de remblai par effet voûte, et indirectement par l'intermédiaire du renfort géosynthétique par effet membrane (fig.4).

La longueur des pieux est fixée à 31m en respectant la règle classique des 3 diamètres d'ancrage du pieu dans la couche résistante (DTU 13-2 / P 11-212). [4]

Le choix de Géotextile de renforcement dépend de la distance entre les casques des pieux ($s-b$), sachant que les dimensions de la tête du pieu sont (3m x 3m x 0.65m).

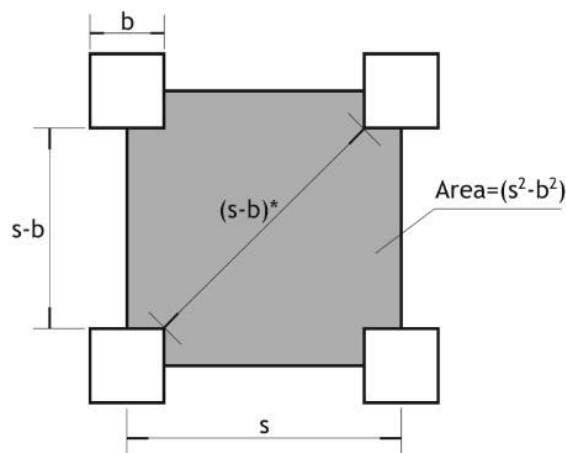


Figure 3. Schéma de fondation par inclusion rigide

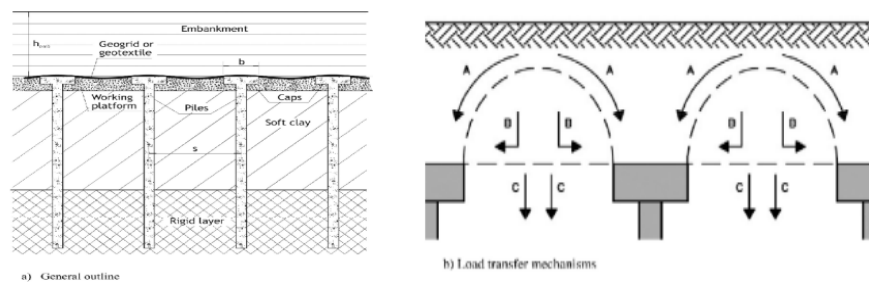


Figure4. Remblai sur pieux renforcé par géosynthétique

3. ANALYSE DU SCHÉMA DE FONDATION SUR PIEUX

3.1 Procédure de réalisation des pieux

3.1.1 Ordre d'exécution

Ordre général d'exécution: Levé et traçage → Excavation de la tranchée de boue → Enterrement du tube protecteur → Fixation du trépan de la foreuse au centre du pieu → Création d'un forage atteignant le fond du pieu de référence → Conformité du dégagement du forage → Descente du tube → Coulage du béton → Levée du tube → Déplacement de la foreuse → Entretien.

L'intervalle de l'exécution des deux forages ne doit pas être inférieur à 12 heures en cas d'exécution en alternance

3.1.2 Exécution du forage

Lors de l'exécution du forage du pieu, la ligne de contrôle de la cote de la tête du pieu doit être marquée sur la paroi du tube protecteur selon le point de référence de la cote. Les relevés des forages doivent être effectués au cours de l'exécution.

3.1.3 tube guide et entonnoir

Il faut choisir le tube guide avec un diamètre de 30cm, et l'entonnoir avec une capacité de 1.5m³.

Les joints du tube guide doivent être étanches lors de son assemblage (Bague d'étanchéité et lubrifiant requis).

Le test d'étanchéité et le test de pression doivent s'effectuer sur le tube guide avant sa première utilisation. Il est qualifié quand aucune fuite n'est détectée sous pression de l'eau de 0.6MPa pendant 20 minutes.

L'extrémité inférieure du tube guide se situe au 30cm-50cm au-dessus du fond de forage.

L'entonnoir sera mis à l'extrémité supérieure du tube guide.

3.1.4 Coulage du béton sous l'eau

La résistance du béton requise pour l'étude du pieu est de RN27. La dimension maximale pour l'agrégat grossier (gravier) ne doit pas être supérieure à 25mm. Pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, l'affaissement de 180~220mm doit être respecté. On utilise du ciment de silicate ordinaire, qui peut être additionné, le cas échéant, d'un adjuvant réducteur d'eau à haut rendement, dont la quantité est déterminée sur la base des essais. Le béton préparé doit présenter de bonnes propriétés. Le béton ne doit pas présenter des phénomènes de ségrégation au cours du transport et de la coulée. Le premier coulage de béton doit être effectué jusqu'à plus de 2 m en dessus de l'extrémité inférieure du tube guide, de façon à ce que le tube enfoncé dans le béton au cours du premier coulage soit d'environ 3m. La profondeur du tube enfoncé dans le béton est entre 2m et 6m lors du coulage ; une personne doit être désigné pour effectuer des mesures en temps voulu pour maîtriser la hauteur de levage du tube. Lors de chaque démontage de tube, il faut mesurer et calculer sa profondeur enfoncée, puis déterminer la longueur à démonter de façon à ce que le béton reste en découlement, et enregistrer les relevés de coulage. Le coulage du béton doit être continu et sans interruption. Après démontage, le tube doit être placé dans une étagère et nettoyé à temps. Lorsque le béton est injecté jusqu'à moins de 5 m de la partie supérieure du forage, le tube ne peut plus être levé. Quand le béton atteint à la cote de référence, le tube peut être complètement retiré. L'injection dépassant la cote de référence de la tête du pieu ne doit pas être inférieure à 1m pour assurer la résistance du béton au niveau de la tête du pieu après le regrattage de la laitance.

3.1.5 Rebouchage du forage et mise en place de la semelle du pieu

Une fois le pieu terminé, le béton au niveau de la tête du pieu doit être regratté à temps de façon manuelle ou à l'aide du perforateur à air comprimé. Et puis le casque du pieu est installé jusqu'à la cote de référence. Lors de la mise en place du casque du pieu, la cote supérieure du pieu doit être mesurée avec précision en contrôlant l'écart à $\pm 2\text{cm}$.

3.2. Procédure de traitement par Géotextile

Cette procédure a pour but d'expliquer et d'appliquer un géotextile de renforcement comme solution complémentaire de la solution pieux.

3.2.1. Géotextile de renforcement

Le géotextile prévu est un géotextile composite de renforcement et séparation, tissé tricoté tramé, à mise en tension immédiate. La structure du géotextile est illustrée sur (fig.5) et (fig.6). L'assemblage par tissage-tricotage-tramage du géotextile tissé en polypropylène (fonction séparation) et les câbles polymères haute résistance (fonction Renforcement) vont permettre une mise en tension immédiate ce qui permet de reprendre les efforts instantanément et de limiter la déformation initiale lors de la mise en tension. [1]

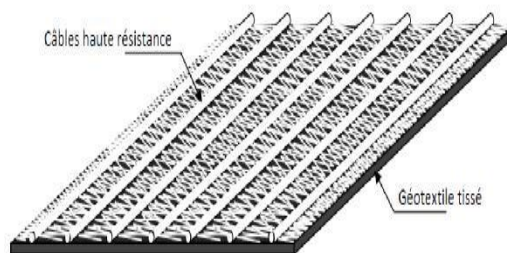


Figure 5. Structure du Géotextile de Renforcement

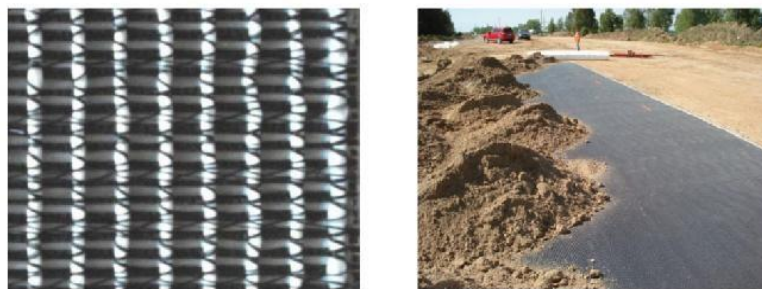


Figure 6. photographie de Géotextile de renforcement

3.2.2. Caractéristiques et principe de fonctionnement

Le Géotextile de de renforcement, par son procédé de fabrication, permet de dissocier les fonctions séparation et renforcement (fig.7). En effet, la résistance en traction du géotextile est obtenue par l'action des câbles polymères haute résistance. La fonction séparation est, quant à elle, assurée par le géotextile tissé dont l'ouverture de filtration est constante et ce quelle que soit la résistance à la traction du géotextile. Ce produit ou d'autre similaire, doit être conforme à la norme ISO 10319 [5].

Le géotextile présente en plus des performances de résistance :

- des résistances élevées au poinçonnement et à la perforation,
- une résistance élevée lors de la mise en œuvre même dans des conditions agressives,
- une perméabilité parfaitement contrôlée pour l'utilisation en fondation.

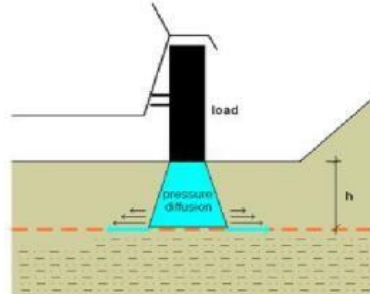


Figure 7. Fonction de Renforcement

Une partie des contraintes verticales du remblai supérieur sont transmises aux pieux par effet voûte au sein du remblai et par effet membrane par géosynthétique (fig.8). La présence du géosynthétique permet également de limiter la déflexion de surface.

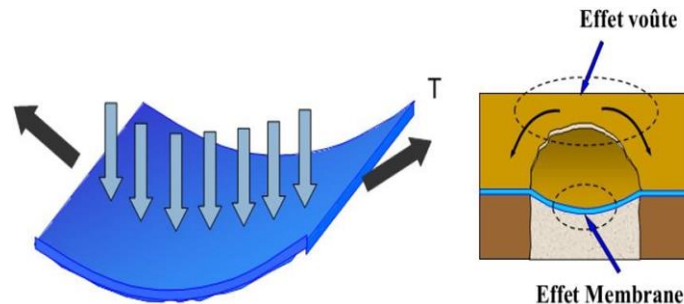


Figure 8. Effet membrane et effet voûte – Source : J.P. GOURC

3.2.3. Mise œuvre du Géotextile de Renforcement

Stockage

Le géotextile, afin de conserver toutes ces propriétés, ne doit pas être exposé à l'eau, au gel, aux rayons du soleil, aux déchirures et perforations, etc.

Installation

Elle s'effectue sur plateformes compactées et nivelées, sans éléments saillants susceptibles d'endommager les nappes de géotextile. L'étalement est réalisé par déroulement manuel ou avec un engin de chantier, avec découpage éventuel des nappes à des longueurs appropriées.

La concordance du sens de pose du géotextile sera impérativement vérifiée avant tout remblaiement. En effet, la résistance des géotextiles est fréquemment plus importante dans le sens production (sens de la longueur du rouleau).

Recouvrements

Le recouvrement dans le sens perpendiculaire au sens de travail (côte à côte) peut se faire par tuilage sur au moins 50 cm (fig.9). Dans le cas des zones à risques de cavités, le recouvrement dans le sens perpendiculaire au sens de travail sera fonction du diamètre maximal de la cavité.

Pour le réglage et le compactage du sol, il conviendra de respecter les règles édictées dans le CCTP et des fascicules de Recommandations pour les Terrassements routiers.

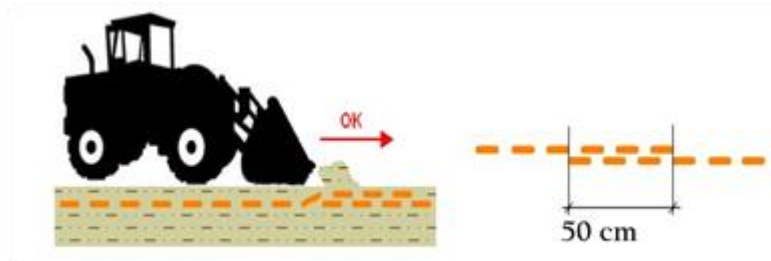


Figure 9. Recouvrement des nappes de Géotextile de Renforcement

3.2.4. Protection du Géotextile de Renforcement et finitions

Le géotextile de renforcement travaille en tant qu'armature, sa dégradation éventuelle serait très préjudiciable pour la pérennité de l'ouvrage.

Il convient donc d'assurer une protection minimale de toutes les nappes visibles des ouvrages renforcés par Géosynthétiques.

Les exigences concernent essentiellement :

Le rayonnement solaire,

La protection mécanique (vandalisme, poinçonnement par chute de pierres...),

3.2.5. Hypothèses géotechniques et dimensionnelles

La justification du géotextile se fait selon la procédure suivant :

1- On calcule la contrainte verticale σ_v agissant sur la base du remblai par la formule de Terzaghi

$$\sigma_v = \frac{(s-b) \left(\gamma_{emb} - \frac{c_{emb}}{(s-b)} \right)}{K \tan \phi_{emb}} \left(1 - e^{-K \tan \phi_{emb} \frac{h_{emb}}{(s-b)}} \right) + q \cdot e^{-K \tan \phi_{emb} \frac{h_{emb}}{(s-b)}} \quad (1)$$

$s-b$: la distance entre deux semelles, avec $s = 6m$ ou $7m$ et $b=3m$

ϕ : Angle de frottement de remblai 35°

h_{emb} : Hauteur de remblai $11,2m$

q : La charge du trafic 20 kpa

C : La cohésion de remblai 10 kN/m^2

γ_{emb} : poids volumique $17,68 \text{ kn/m}^3$

K : Coefficient de poussée des terres $1,46$

2- On calcule l'effort de traction agissant sur le géotextile pour une déformation maximale ϵ_{ult} de 10%, et q désigne la contrainte verticale (en prenant compte les coefficients partiels sur les matériaux et les surcharges).

$$T_{\max,ELU} = \frac{q \cdot (s-b)}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{6 \cdot \epsilon_{ult}}} \quad (2)$$

La résistance à la traction de géotextiles doit être

(3)

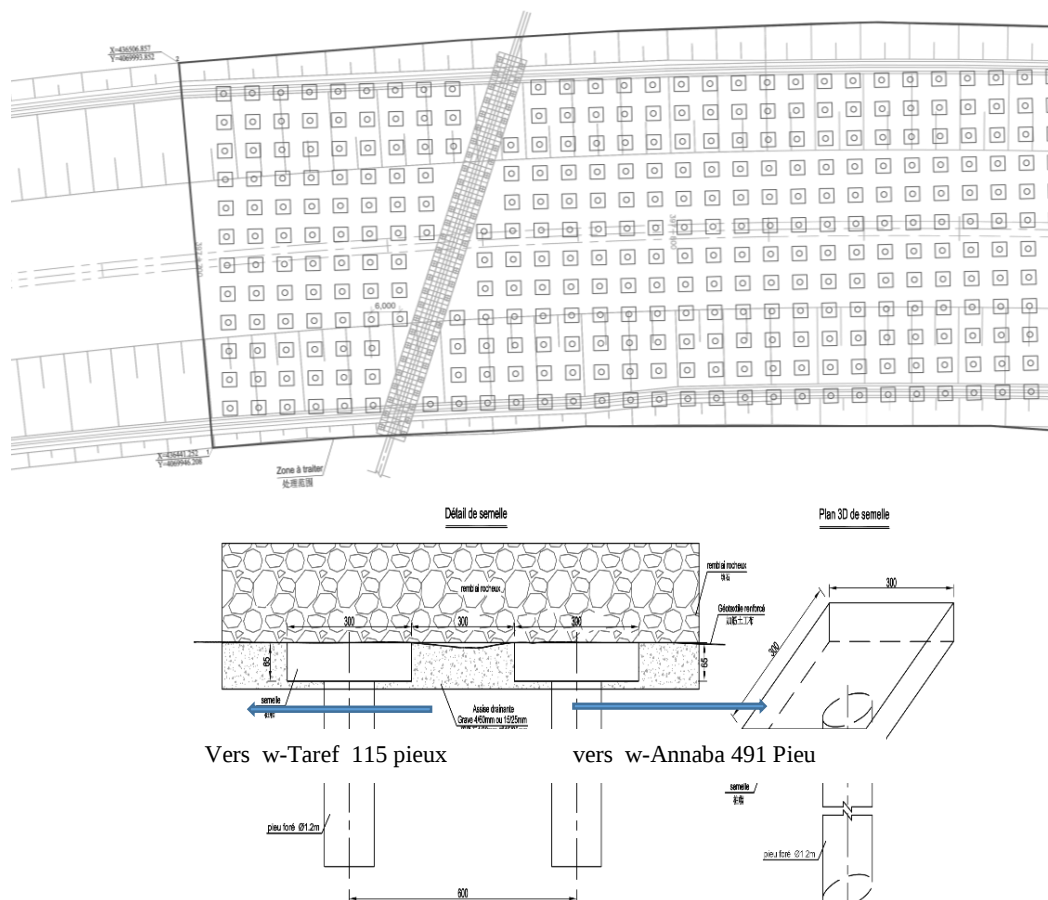
$$R_t \geq T_{\max ; ELU} \times \Gamma_{Geo}$$

Γ_{Geo} : Coefficient partiel

$$\Gamma_{Geo} = \gamma_{MT} \times \Gamma_{flu} \times \Gamma_{veil} \times \Gamma_{inst} = (1,25 \times 1,7 \times 1,1 \times 1,2) \quad (4)$$

4. ANALYSE COMPARATIVE DES SOLUTIONS PIEUX

Plusieurs variantes vont être étudiées et ce pour déterminer celle qui techniquement et financièrement est la plus adaptée au cas d'étude présenté sur la (fig.10) et la (fig.11).



Figyre10. Variante 1 : Espacement de 6 m entre Pieux & Géotextile de Renforcement de 600/600 (kn/m)

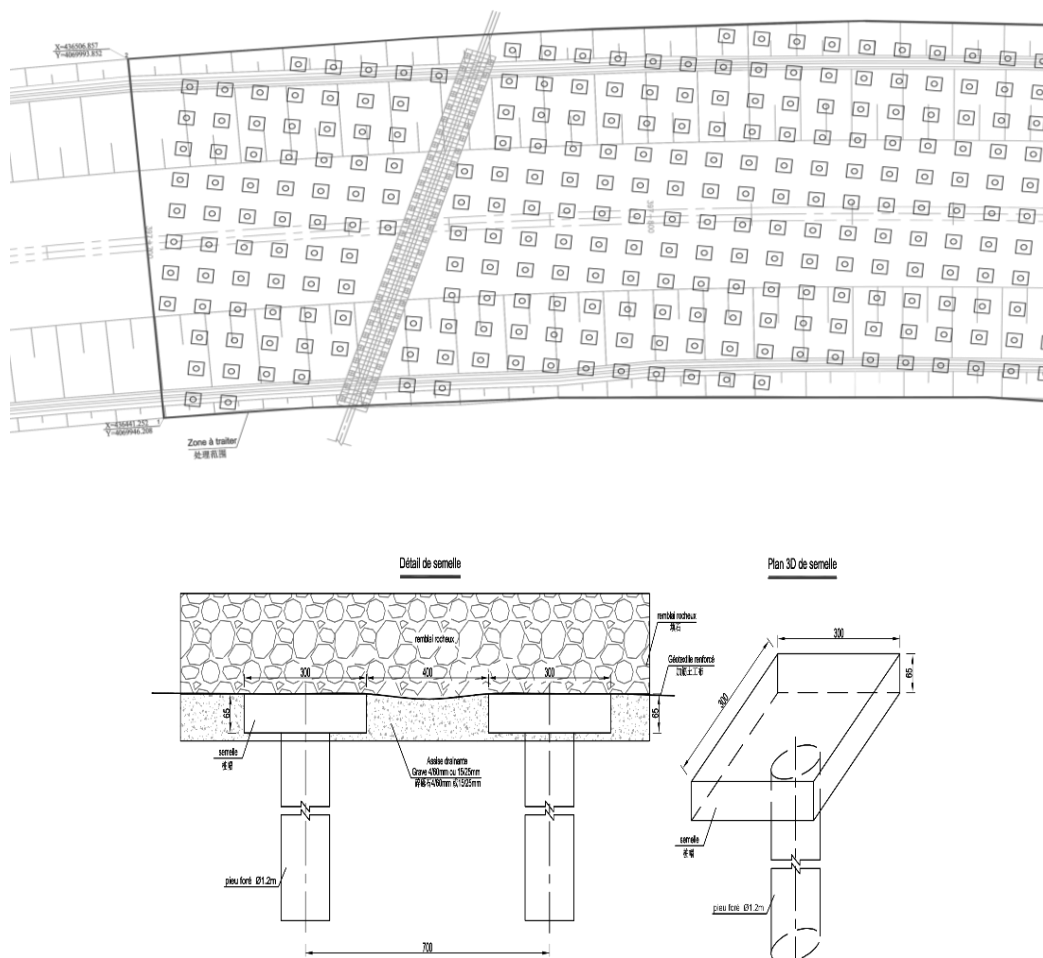


Figure 11. Variante 2 : Espacement de 7 m entre Pieux & Géotextile de Renforcement de 800/800 (kn/m)

Les résultats de calcul pour les deux variantes de l'entraxe de 6m et 7m sont présentés et récapitulés dans le tableau 1 & le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 1. Résultats de Calcul des deux variantes

s-b (m)	σ_v (kN/m ²)	$T_{\max,ELU}$ (kN/m)	Γ_{Geo}	R_t	Géotextile recommandé
3	59,52	157	2,8	441	600/600
4	77,26	268	2,8	750	800/800

Tableau 2. Résultats des deux variantes

variante	Entraxe (m)	Nombre des pieux	Nombre des semelles	Diamètre (m)	Longueur du pieu (m)	Classe de géotextile de renforcement	Quantité de géotextile de renforcement	Durée des Travaux	Coût de construction (DA)
variante 1	6	606	606	1.2	31	Type 600/600	28 120 m ²	3 mois pour l'exécution des pieux, et 2 mois pour l'exécution de la plate-forme 5 mois au total	644.086.511,26
variante 2	7	451	451	1.2	31	Type 800/800	28 120 m ²	2,5 mois pour l'exécution des pieux, et 2 mois pour l'exécution de la plate-forme 4,5 mois au total	497.680.995,64

Selon les résultats du tableau.2 un renforcement de 800/800 est à adopter. Par ailleurs La difficulté de fabrication d'un géotextile de renforcement bidirectionnel de forte résistance comme le 800/800 à pousser l'entreprise a désigné un géotextile de renforcement monodirectionnel 800/50 posé en deux (02) nappes croisées avec une couche de remblai (TUFF) intermédiaire de 15-20cm (fig.12) et ce selon les recommandations du Fabricant des geosynthetiques.

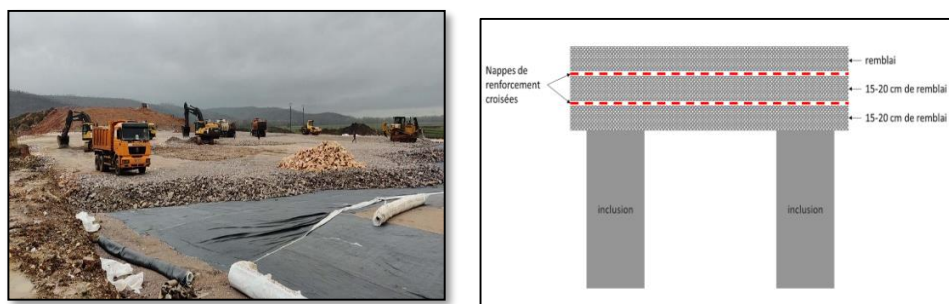


Figure 12. Détail de pose de Nappes de géotextiles de renforcement croisées

5. Conclusion

Sur la base de l'analyse préliminaire ci-dessus, l'entreprise chinoise CITIC-CRCC a estimé que l'entraxe des inclusions rigides (pieux forés) ajusté à 7m, est préférable à celui de 6m et ce en associant un géotextile de renforcement de 800/800 kn/m au lieu de 600/600 kn/m permettront un Délai plus court de (15) quinze jours avec 151 pieux « 40 000 m³ de Béton armé » en moins ; En conséquence un gain sur le Coût de la construction de la plate-forme routière de l'ordre de 146 millions Dinars Algérien.

En conclusion faire contribuer la résistance à la traction du géotextile de renforcement sur inclusion rigides aide fortement à désigner le meilleur entraxe des pieux. La solution technique « Renforcement sur Inclusions Rigides » est recommandée pour pouvoir avoir le meilleur Délai des travaux et un gain sur le coût de la construction. Sans oublier aussi les avantages à ne pas négliger pour l'Environnement en particulier avoir épargné l'émission de 47 tonnes de CO₂ dans l'atmosphère ainsi que réduire le potentiel du réchauffement climatique dû au CH₄ qui est 20 fois supérieur à celui du CO₂.

Références

- [1] Fascicule préliminaire Guide d'utilisation des normes de dimensionnement dans la conception des ouvrages avec géosynthétiques : géotextiles et produits apparentés
- [2] Combarieu O. - Amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Application à l'édification de remblais sur sols médiocres. Revue française de géotechnique. n° 44. 1988, p. 57-79.
- [3] le rapport de reconnaissance géologique établi par COJAAL (2014).
- [4] règle classique des 3 diamètres d'ancrage du pieu dans la couche résistante (DTU 13-2 / P 11-212).
- [5] Norme ISO 10 319 –geosynthétiques essais de traction des bandes larges
- [6] Article de recherche Rev. Fr. Geotech. 2020 « Amélioration des sols par inclusions rigides : le rôle des géosynthétiques dans la plateforme de transfert de charge » Bruno Simon, Laurent Briançon et Luc Thorel