

Effet de l'interaction sol-structure sur le comportement d'un remblai renforcé par des armatures métalliques

Naoui Tallah, Saâd Aidjouli, Mohamed Khemissa

*Laboratoire de Développement des Géomatériaux, Département de Génie Civil,
Faculté de Technologie, Université de M'sila, 28000 M'sila, Algérie*

Résumé

Le comportement des remblais renforcés est un problème d'interaction sol-structure. Le procédé de renforcement à l'aide d'armatures métalliques, appelé "terre-armée", en est l'exemple type. Ce procédé est utilisé pour augmenter la stabilité de l'ouvrage et réduire les déformations qu'il peut subir sous l'action des charges monotones ou cycliques. Le mécanisme de fonctionnement du matériau "terre-armée" est basé sur l'interaction entre le sol constituant le corps du remblai et les armatures métalliques utilisées pour son renforcement. Pour un sol de caractéristiques géotechniques données, cette interaction est mieux ressentie pour une armature rugueuse que pour une armature lisse de même type.

Mots clés : Remblai renforcé, Terre-armée, Interaction sol-structure, Rugosité.

1. Introduction

Les remblais sur sols mous ont fait l'objet de nombreux développements depuis plusieurs décennies (Khemissa, 1999). La construction d'un remblai sur sols mous pose de nombreux problèmes associés à la fois à la faible résistance de ces sols et à leur forte compressibilité. Ils présentent en outre des particularités qui concernent spécialement l'aménagement général du chantier (routes d'accès et pistes de chantiers), les couches inférieures (caractère perméable et déformable des matériaux placés à la base des remblais), le choix et la mise en œuvre du matériau de remblai (sensibilité à l'eau, conditions météorologiques, procédés de compactage, etc.). Outre une étude géotechnique détaillée du massif de sa fondation, le dimensionnement d'un remblai exige que soient précisées certaines données comme la fonction de l'ouvrage (remblai routier courant, remblai d'accès à un ouvrage, digue de retenue d'eau, etc.), ses caractéristiques géométriques (hauteur minimum et largeur en crête, emprise disponible), la méthode et le calendrier de sa construction (en une seule ou plusieurs étapes, utilisation ou non de drains), etc. Ces données permettent de prédire le mode de rupture probable et de choisir la méthode de dimensionnement adéquate pour évaluer la stabilité du remblai, l'amplitude et la vitesse des tassements et des déplacements horizontaux du massif argileux de fondation. Lorsque le profil théorique du remblai est stable et le tassement du sol de fondation est acceptable, aucun traitement particulier n'est à appliquer. Toutefois, les règles de construction habituelles, qui comprennent les opérations d'extraction, de chargement, de transport, de déchargement, de régalage en couches élémentaires et de compactage des matériaux utilisés, doivent être conformes aux dispositions contractuelles prévues dans les cahiers des charges pour obtenir la qualité recherchée pour ce type d'ouvrages. Dans le cas contraire le remblai doit être renforcé.

Les techniques de renforcement des remblais, qui peuvent être mises en œuvre selon le (ou les) problème(s) posé(s), sont nombreuses et variées. On peut citer les techniques courantes (la construction par étapes, stabilité au moyen de banquettes latérales, allègement du corps du remblai à l'aide de matériaux de faible densité, renforcement du sol de fondation par des colonnes ballastées ou par des colonnes traitées à la chaux ou au ciment), et les techniques peu courantes (la substitution partielle ou totale du sol de fondation par un matériau de caractéristiques meilleures, drains verticaux et/ou des tranchées drainantes, renforcement par géotextiles et par le procédé "terre armée"). Ces techniques permettent, soit d'améliorer la stabilité des remblais, soit d'accélérer le processus de consolidation ou encore de diminuer le tassement final du sol de fondation, ou de résoudre les deux problèmes à la fois. On utilise aussi d'autres techniques comme le pilonnage, l'électro-osmose ou l'électro-injection, qui posent malheureusement des problèmes technologiques importantes.

Le comportement des remblais renforcés à l'aide d'inclusions est un problème d'interaction sol-structure. Le problème d'interaction sol-structure a fait l'objet de nombreuses recherches parmi lesquelles on peut citer les travaux de Alimi et al. (1977), De Gennaro et Frank (2002), Khemissa et al. (2004, 2015), Li et al. (2015), Ferreira et al. (20015), Bacas et al. (2015) et Braja Das (2016).

Cette communication présente les résultats d'une contribution supplémentaire avec pour objet d'analyser à l'aide du code Plaxis (Brinkgreve et Vermeer, 2002) la stabilité d'un remblai routier fondé sur sol compressible et renforcé à l'aide d'éléments de terre armée présentant diverses formes de rugosité.

2. Modèle géométrique considéré et procédure de calcul suivie

Le modèle géométrique de référence considéré représente un remblai fondé sur un sol bicouche (figure 1).

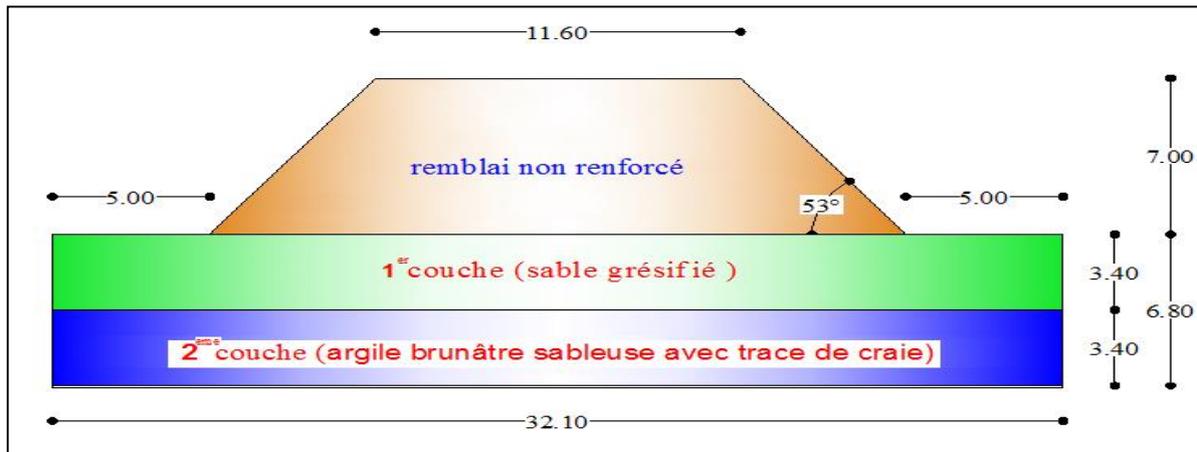


Figure 1. Profil du remblai non renforcé (modèle de référence)

La figure 2 présente le maillage effectué pour le modèle de calcul considéré et les conditions aux limites correspondantes.

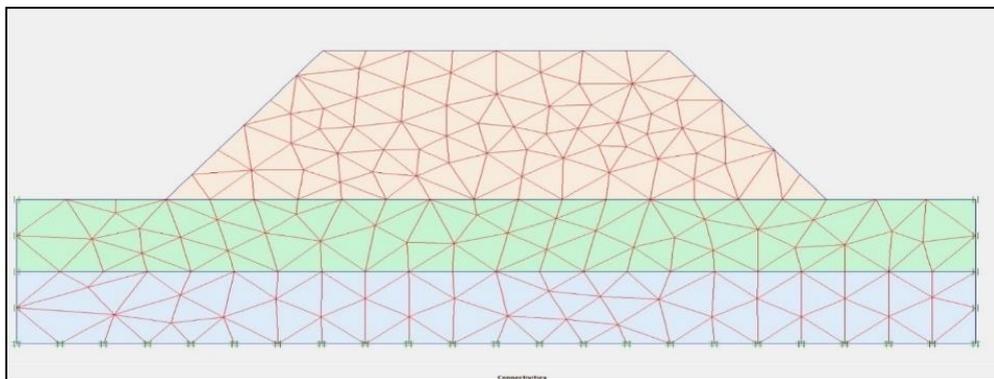


Figure 2. Maillage et conditions aux limites avec le code Plaxis

Les modèles de comportement adoptés sont le modèle élastoplastique de type Mohr-Coulomb pour les sols et les interfaces et le modèle élastique linéaire pour les armatures de renforcement. Le tableau 1 donne les valeurs des paramètres de calcul retenues pour les matériaux constituant le remblai et sa fondation.

Tableau 1. Caractéristiques géomécaniques du remblai et de sa fondation

Paramètres	Remblai	Couche 1	Couche 2
Modèle de comportement	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Type de comportement	Drainée	Drainée	Drainée
Poids volumique sec, γ_d (kN/m ³)	19	17,7	18
Poids volumique saturé, γ_{sat} (kN/m ³)	21	20,2	20,1
Module d'Young, E_{ref} (MPa)	50	10	10
Coefficient de Poisson, ν	0.30	0,35	0,35
Cohésion, c_{ref} (kPa)	0.001	0,050	0,25
Angle de frottement interne, ϕ (°)	35	29,5	27
Angle de dilatace, ψ (°)	5	0	0
Facteur de réduction (interface)	0.84	-	-

Le principe de la terre armée repose sur l'association d'armatures métalliques à un remblai mis en œuvre par couches successives. Les efforts de poussée des terres sont repris par frottement sol-armatures. Les armatures sont solidarisiées à un parement généralement en béton. Ce procédé consiste en l'association de trois éléments principaux, à savoir :

- Le remblai constitué d'un sol plus ou moins frottant.
- Le parement constitué d'éléments en béton préfabriqué (écailles), dont la fonction mécanique est très limitée.

- Les inclusions horizontales et linéaires appelées "armatures" qui jouent le rôle d'éléments de renforcement.

Les panneaux ou écaillés en béton sont modélisés en utilisant des éléments de poutres représentés par l'objet « Beam » dans le code de calcul Plaxis. Ils sont utilisés pour simuler des éléments structurels. Leurs résistances limites en traction et en compression sont spécifiées dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des écaillés en béton

Modèle de comportement	Elastique linéaire
Poids volumique sec, γ (kN/m ³)	25
Module d'Young, E (MPa)	15000
Coefficient de Poisson, ν	0,2

Pour reproduire la flexibilité d'un mur réel, les poutres sont reliées verticalement par des rotules. De plus, dans la structure réelle, des joints élastomères sont insérés entre les panneaux afin d'assurer le bon espacement. Ils empêchent les panneaux d'avoir des points de contact et évitent l'effritement du béton. Le joint élastomère est pris en compte dans la modélisation numérique en réduisant artificiellement la section de la poutre, mais en conservant son moment d'inertie réel.

Les armatures de renforcement sont mises en place par paire de bandes de 30 mm de large (2x30 mm). Dans le modèle numérique 2D, ces bandes sont simplifiées et considérées comme des armatures continues dont les caractéristiques géométriques et physiques sont calculées comme étant le ratio des caractéristiques pour la largeur du terrain considéré (tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques des armatures de renforcement

Type de comportement	Élastique-linéaire
Rigidité normale, EA (kN/ml)	$1,6 \times 10^5$
Largeur de bande, b (m)	0,03 m
Longueur de bande, L (m)	Variable

3. Résultats des calculs et discussion

Les calculs de stabilité permettent de déterminer le lieu de passage de la courbe de rupture le long de laquelle le risque de glissement est le plus élevé et la valeur du coefficient de sécurité correspondante. Le principe du calcul de stabilité des talus à l'aide du logiciel Plaxis se traduit par le calcul d'un facteur de sécurité en utilisant la méthode de réduction paramètres de cisaillement, appelée "φ-c reduction method". Cette approche consiste à diviser la résistance au cisaillement le long de la surface de glissement pour que la masse potentiellement stable soit à la limite de l'équilibre. Dans un premier lieu on analyse le comportement du remblai non renforcé, puis on va traiter les autres cas de renforcement en utilisant les armatures métalliques.

3.1 Remblai non renforcé

Les calculs effectués sur le talus non renforcé sous son poids propre ont donné un coefficient de sécurité $F_s=0.4$. Le remblai est donc instable et nécessitera d'être renforcé. Les calculs indiquent aussi que la rupture de l'ouvrage a lieu après 0.13% de l'application de la charge due au poids propre du sol. Aussi, proposera-t-on de renforcer le remblai par des nappes d'armatures disposées horizontalement et l'on envisagera successivement 8, puis 10 et enfin 12 nappes d'armatures.

3.2 Remblai renforcé par huit nappes d'armatures

La figure 3 présente la coupe du remblai renforcé par 8 nappes d'armatures disposées horizontalement et espacées de 1m. Les calculs ont été effectués par huit phases successives représentant chacune la phase d'installation d'une nappe d'armatures. Pour les phases 1 à 7 correspondant à la pose de 7 nappes d'armatures, on remarque que le remblai est stable. Cependant, pour la phase 8 correspondant à la pose de la dernière couche du matériau du remblai qui existe au-dessus de la dernière nappe d'armatures, on remarque que l'ouvrage n'est pas stable. Les calculs correspondant à cette dernière phase indiquent que la rupture de l'ouvrage a lieu à 2.03 % de l'application de la charge due au poids propre du sol existant au-dessus de la dernière nappe d'armatures.

3.3 Remblai renforcé par dix nappes d'armatures

La figure 4 présente la coupe du remblai renforcé par 10 nappes d'armatures. On remarque que le remblai reste stable jusqu'à la 10^{ème} phase correspondant à l'application du poids du remblai existant au-dessus de la dernière nappe d'armatures. Cependant, l'application d'une surcharge de 300 kN/ml déstabilise le remblai et sa rupture a lieu après 3.35% de l'application de la surcharge.

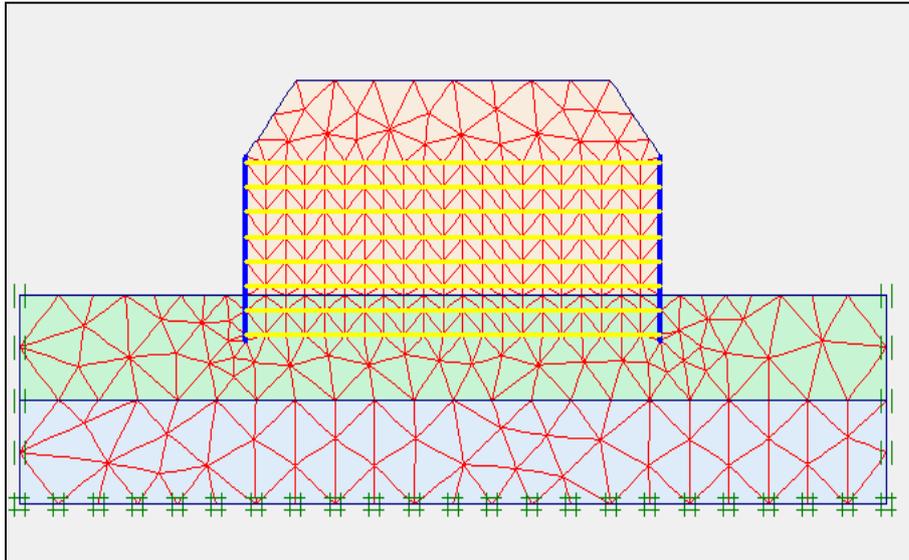


Figure 3. Talus renforcé par huit nappes d'armatures

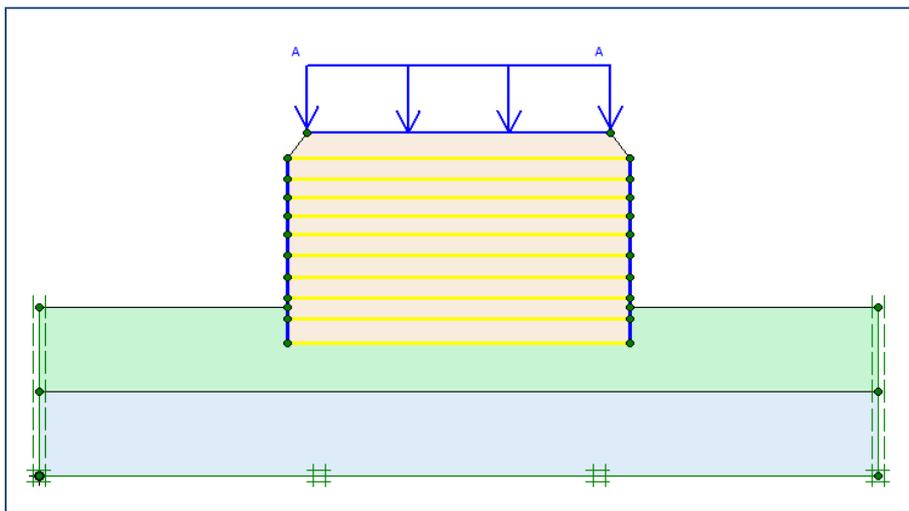


Figure 4. Talus renforcé par dix nappes d'armatures

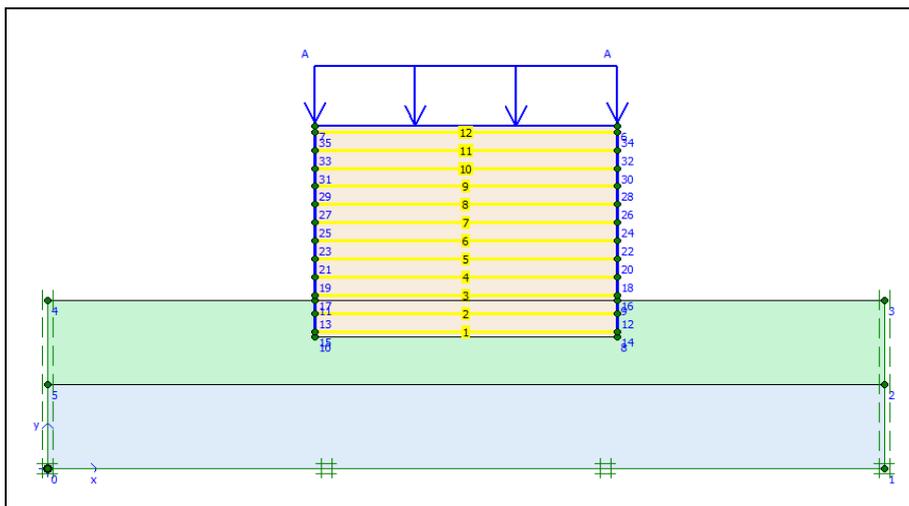


Figure 5. Talus renforcé par douze nappes d'armatures

3.4 Remblai renforcé par douze nappes d'armatures

La figure 5 présente la coupe du remblai renforcé par 12 nappes d'armatures. On remarque que le remblai est stable jusqu'à la 12^{ème} phase correspondant à l'application d'une surcharge de 1300 kN/ml.

3.5 Synthèse

Les résultats de cette simulation numérique ont permis de déduire des conclusions très importantes concernant le comportement des structures renforcées en terre armée. La modélisation effectuée en utilisant un mur renforcé par huit armatures, le mur n'est pas stable et la rupture de l'ouvrage a lieu après l'application de 2.03% du poids du sol qui existe au-dessus de l'armature supérieure. La modélisation effectuée en utilisant un mur renforcé par dix armatures et en cinq écailles de béton, on remarque que l'ouvrage est stable mais lors de l'application de la charge 1300 kN/ml l'ouvrage n'est pas stable. Dans le dernier cas où l'on a utilisé un mur renforcé par douze armatures et en six écailles de béton, on remarque que l'ouvrage est stable même après l'application d'une surcharge de 1300 kN/ml bien que le remblai est fondé sur un sol non cohérent ($c=0$) et la forme du talus devient de forme rectangulaire de 11.60 m ce qui est la bonne solution pour les talus de grande hauteur et surtout lorsque il y a pas assez d'espace comme dans les cas des échangeurs des routes à l'intérieure des tissus urbains.

4 Effet de l'interaction sol-structure sur le comportement du remblai renforcé

Pour étudier l'effet de l'interaction sol-structure sur le comportement du remblai renforcé, on a fait varier le facteur de réduction des efforts à l'interface R_{inter} des barres métalliques de $R_{inter}=0.1$ à $R_{inter}=0.8$ avec un pas de 0.1 et on a étudié l'influence de cette variation sur les paramètres suivants :

- Le déplacement horizontal ;
- Le déplacement vertical ;
- La contrainte horizontale ;
- La contrainte verticale ;
- La contrainte tangentielle.

4.1 Effet de l'interaction sol-structure sur le déplacement horizontal

D'après la figure 6, on constate que l'augmentation de la rugosité l'interface des barres de $R=0.1$ à $R=0.8$ conduit à une diminution du déplacement horizontal et à partir de $R=0.8$ il devient stable.

4.2 Effet de l'interaction sol-structure sur le déplacement vertical

D'après la figure 7, on constate la même remarque pour le cas du déplacement horizontal, c'est à dire que l'augmentation de la rugosité de l'interface des barres de $R=0.1$ à $R=0.8$ conduit à une diminution du déplacement vertical et à partir de $R=0.8$ il devient stable.

4.3 Effet de l'interaction sol-structure sur la contrainte horizontale

D'après la figure 8, on remarque qu'une augmentation de la rugosité de l'interface des barres de $R=0.1$ à $R=0.8$ conduit à une diminution très remarquable de la contrainte horizontale et à partir de $R=0.8$ elle devient stable.

4.4 Effet de l'interaction sol-structure sur la contrainte tangentielle

D'après la figure 9, on remarque qu'une augmentation de la rugosité de l'interface des barres de $R=0.1$ à $R=0.8$ conduit à une diminution de la contrainte tangentielle et à partir de $R=0.5$ elle devient stable.

4.5 Effet de l'interaction sol-structure sur la contrainte tangentielle dans l'interface entre le sol et les armatures métalliques de renforcement

D'après la figure 10, on remarque qu'une augmentation de la rugosité de l'interface des barres de $R=0.1$ à $R=0.8$ conduit à une augmentation de la contrainte tangentielle dans l'interface entre le sol et les armatures et cette augmentation est plus remarquable dans la première nappe d'armatures.

4.6 Effet d'interaction sol-structure sur coefficient de sécurité

D'après la figure 11, on remarque qu'une augmentation de la rugosité de l'interface des barres de $R=0.1$ à $R=0.8$ conduit à une augmentation du coefficient de sécurité F_s et à partir de $R=0.8$ il devient presque constant.

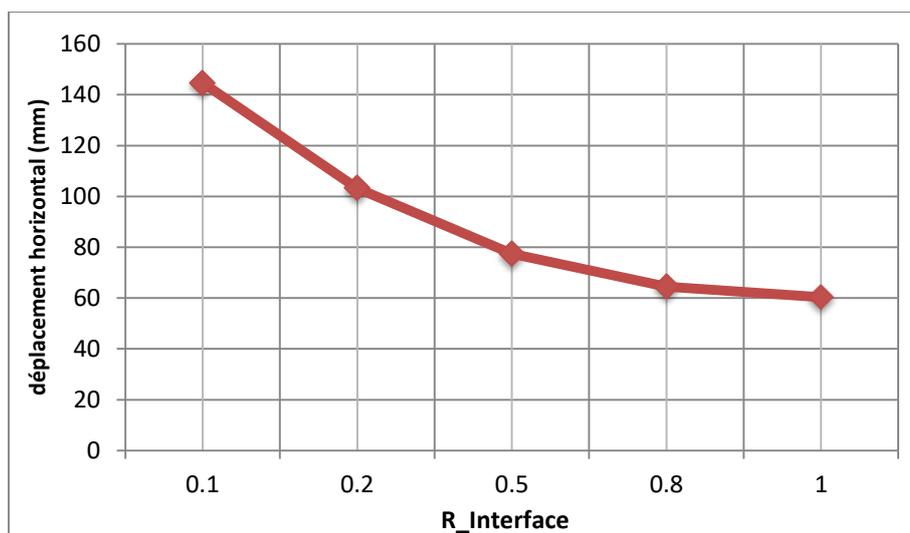


Figure 6. Effet de l'interaction sol-structure sur le déplacement horizontal

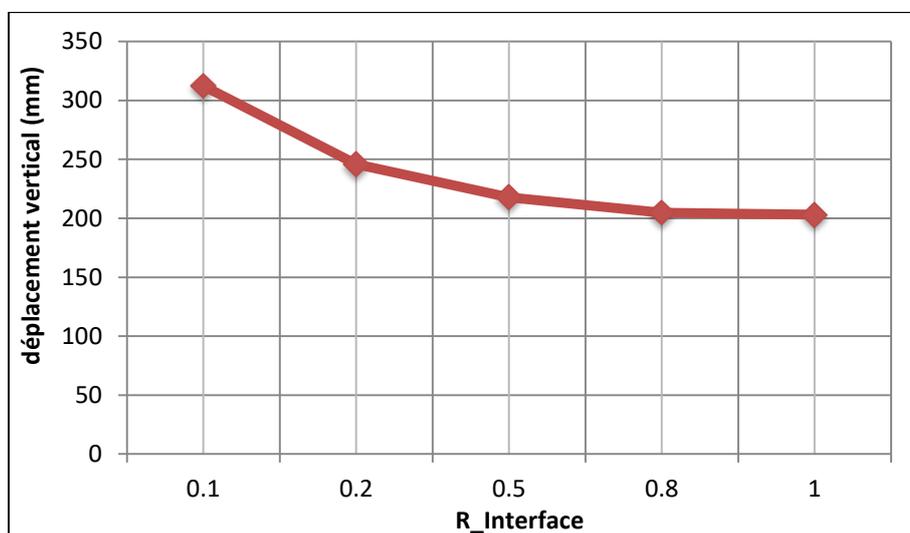


Figure 7. Effet de l'interaction sol-structure sur le déplacement vertical

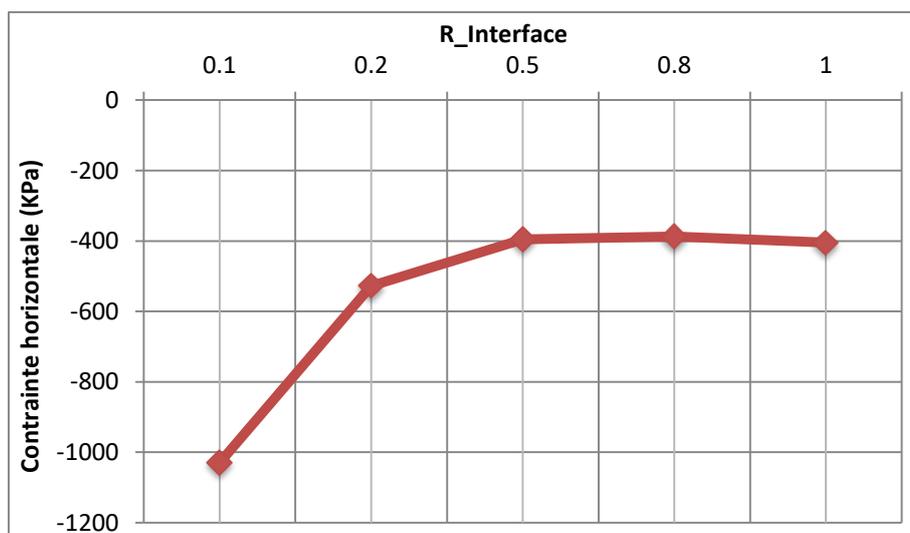


Figure 8. Effet de l'interaction sol-structure sur la contrainte horizontale

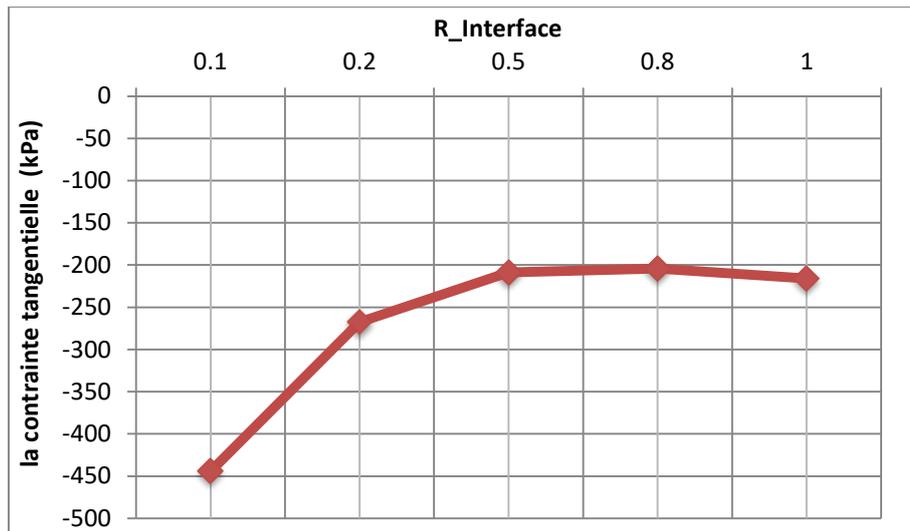


Figure 9. Effet de l'interaction sol-structure sur la contrainte tangentielle

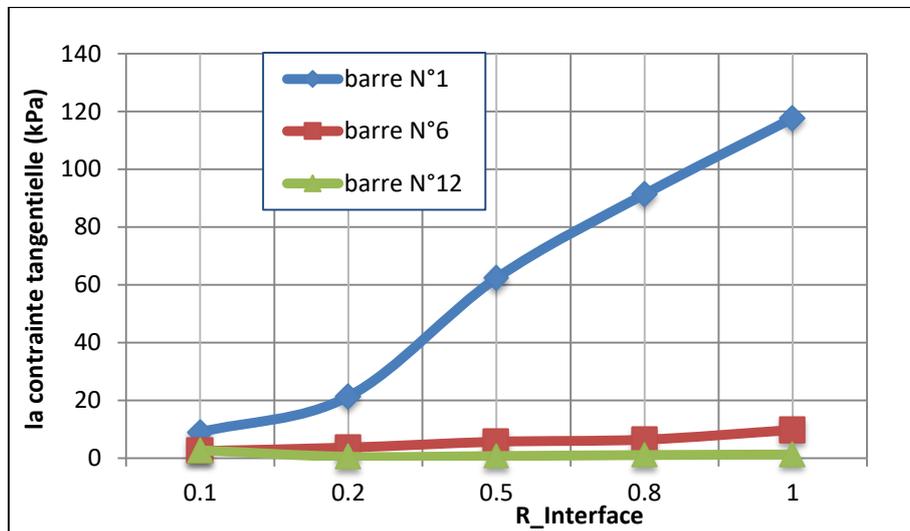


Figure 10. Effet de l'interaction sol-structure sur la contrainte tangentielle

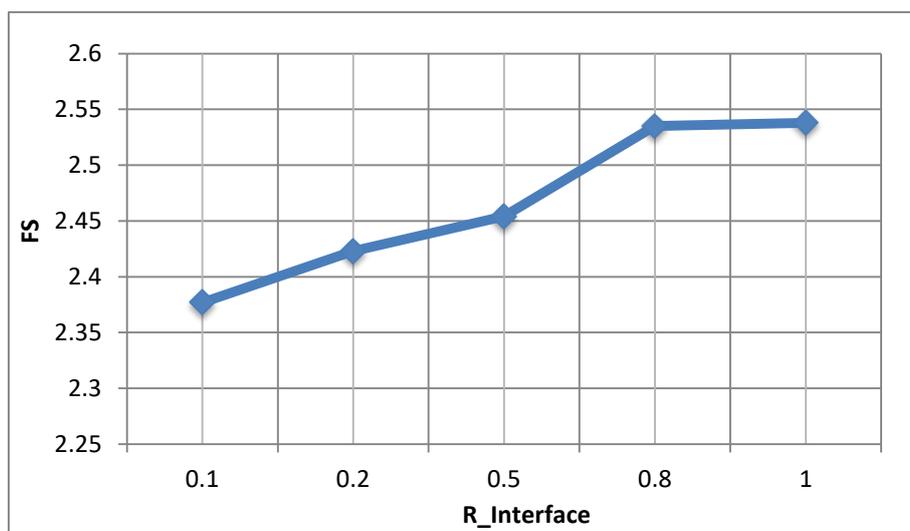


Figure 11. Effet de l'interaction sol-structure sur le coefficient de sécurité

5 Conclusion

Le procédé "terre armée" sont utilisés dans le cas de remblais routiers, de culées de ponts et d'ouvrages de soutènement. L'avantage de ce matériau est sa grande déformabilité qui permet aux ouvrages de s'adapter sans trop de risques à des mouvements importants du sol de fondation. Les études expérimentales montrent que ce type de renforcement présente l'inconvénient du coût et du délai de conception et de réalisation. Cependant, la modélisation numérique finis permet d'analyser la stabilité, la déformation et l'influence de plusieurs paramètres en tout point du modèle dans un temps raisonnable.

L'analyse des résultats des calculs effectués à l'aide du code Plaxis a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le remblai est de hauteur 7.00 m au-dessus du terrain naturel, et reste toujours instable, même qu'il soit en forme trapézoïdale et avec une largeur de 22.10 m à la base et 11.60 m au sommet, mais après inclusion des armatures métalliques on a pu le rendre stable et en forme rectangulaire de largeur 11.60 m.
- La diminution de l'espacement vertical entre les lits d'armatures et par la suite entre les écailles de béton permet de diminuer les déplacements et la contrainte de cisaillement dans les barres métalliques, et d'augmenter le coefficient de sécurité.

L'étude de l'effet de l'interaction sol-structure sur le remblai renforcé a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation de la rugosité de l'interface par le biais du paramètre R_{int} engendre une diminution autour de 50% dans les valeurs des déplacements horizontal et vertical si R_{int} varie de 0.1 à 0.8.
- L'interface des barres a un rôle principal dans la stabilité de l'ouvrage et cette étude montre que la valeur idéale de l'interface est $R_{int}=0.8$.

On peut enfin conclure que l'interaction sol-structure dans les remblais renforcés par armatures métalliques ont un grand effet sur le comportement de ces ouvrages, que ce soit pour l'ouvrage lui-même ou pour les inclusions métalliques, malgré ça cet effet est toujours négligé dans les études des cas pratiques.

Références bibliographiques

- Alimi I, Bacot J, Lareal P, Long, NT, Schlosser F (1977) Etude de l'adhérence sol-armature. In: Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Tokyo, Japan, vol 1, pp 11–14.
- Bacas BM, Canizal J, Konietzky H (2015) Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces. *J Rock Mech Geotech Eng* 7(6):638–645.
- Braja M Das (2016) Use of geogrid in the construction of railroads. *Innov Infrastructure Solut* 1:15.
- Brinkgreve RBJ, Vermeer PA (2002) Plaxis: finite element code for soil and rock analyses (version 8.2). Balkema, Rotterdam, Brookfield, Netherlands.
- De Gennaro V, Frank R (2002) Elasto-plastic analysis of the interface behaviour between granular media and structure. *Comput Geotech* 29(7):547–572.
- Ferreira FB, Vieira CS, Lopes ML (2015) Direct shear behaviour of residual soil-geosynthetic interfaces-influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type. *Geosynth Int* 22(3):257–272.
- Khemissa M (1999) Méthodologie d'étude et règles de construction des remblais sur sols compressibles. Actes du Séminaire sur les terrassements dans les grands travaux, ARAL, Sétif, 30-31 mai 1999.
- Khemissa M, Safer S, Aidjouli S (2015) Roughness's shapes comparative analysis of some reinforced earth elements under monotonous loading. *Alexandria Eng J* 54(3):577–582.
- Khemissa M, Safer S, Sahli M, Meddah A (2004) Etude des performances de quelques éléments de terre armée. In: Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering, GeoBeyrouth, University of Lebanon, pp 269–274.
- Li Yao-Kun, Han Xiao-Lei, Ji Jing, Dong-Long Fu, Qiu Yan-Kun, Dai Bai-Cheng, Lin Chao (2015) Behavior of interfaces between granular soil and structure: a state-of-the-art review. *Open Civ Eng J* 9:213–223.