

TECHNIQUES DE MODELISATION MULTIPHYSIQUE DES GEOSYNTHETIQUES

YALAOUI Nadia¹, TROUZINE Habib^{1,2,3}, METERFI Yasmine¹, MEGHACHOU Mourad¹

¹ Laboratoire de Génie Civil et Environnement, faculté de Technologie de l'Université Djilali Liabés à Sidi Bel Abbés (Algérie).

² Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (EOLE), faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd à Tlemcen (Algérie).

³ Association scientifique algérienne des géosynthétiques – Bureau Ouest

*(nadia_yaal@yahoo.fr) Email of the corresponding author

RESUME :

Les techniques de renforcement par des géosynthétiques est une solution de renforcement largement utilisée, à la fois pour ses avantages économiques et environnementaux. Donc des nombreux problèmes géotechniques nécessitent une compréhension approfondie de l'interaction entre le squelette du sol et son environnement. En raison de l'interaction entre le squelette du sol et d'autres phénomènes de transport solide par de l'eau, une approche couplée est essentielle pour expliquer le comportement et la réponse réelle du sol en présence de tels processus multiphysiques. L'objectif de ces techniques est d'améliorer la performance mécanique et hydraulique de terrains de qualité médiocre, tant au niveau de la réduction attendue du tassement des fondations que de l'augmentation de la capacité portante.

MOTS CLES :

Géosynthétiques, capacité portante, multiphysique, hydromécanique, modélisation numérique.

1. INTRODUCTION

Les géosynthétiques représentent une innovation parmi les plus importantes dans le domaine de l'ingénierie géotechnique. Ce sont des matériaux synthétiques utilisés dans la construction pour renforcer le sol et contrôler l'érosion. Ils comprennent divers produits tels que les géotextiles, les géogrilles et les géomembranes, chacun ayant des applications géotechniques, géoenvironnementales, hydrauliques et de génie des transports (chaussées, plateformes, stockage de déchets, mines etc.) L'utilisation des géosynthétiques permet de prolonger la durée de vie des infrastructures tout en optimisant les coûts et réduisant l'impact environnemental.

Ces produits sont utilisés en remplacement et/ou en complément des matériaux naturels (sables, argiles, graviers, etc.) Il est facile d'identifier la fonction principale d'un géosynthétique comme étant : la séparation, la filtration, le drainage, le renforcement, le confinement des fluides/gaz ou le contrôle de l'érosion. Dans certains cas, le géosynthétique peut remplir une double fonction.

Afin d'apporter une solution optimale, il est nécessaire d'une analyse minutieusement des problématiques. Chaque solution géosynthétique est rigoureusement étudiée en tenant compte des conditions de chantier (contraintes hydromécaniques, chimiques, etc.).

La modélisation numérique est un outil performant qui permet de simuler le comportement hydromécanique des ouvrages géotechniques dans différentes configurations. Ces calculs permettent d'évaluer le champ de déplacements, de déformations, de contraintes à la fois dans le terrain et dans les éléments structurels géosynthétiques. Ils permettent ainsi d'éclairer les choix techniques et financiers des projets et de les optimiser. La modélisation numérique permet en effet de fournir des solutions à des problèmes qui ne peuvent être traités à l'aide des méthodes traditionnelles qu'au prix de simplifications difficiles à justifier.

L'objectif de cette communication nécessite deux types de modélisation numériques. Tout d'abord, une optimisation des différents paramètres pour un renforcement approprié permettant d'améliorer la capacité portante du sol et de réduire les tassements. En seconde lieu on s'intéresse à l'analyse de l'interaction entre les différents phénomènes, par l'utilisation d'une approche multiphysique et multi échelles, depuis l'échelle de la particule jusqu'à celle de l'ouvrage avec prise en compte des différents chemins mécaniques, hydriques dans différentes conditions. Une simulation d'un cas réel d'une

infrastructure de tramway conçu dans une zone marécageuse est analysée afin d'explorer le comportement de l'ensemble en comparant les comportements hydromécaniques en mettant le point sur l'apport des géosynthétiques.



Figure1. Les géosynthétiques

2. MODELISATION DES GEOSYNTHETIQUES

L'objectif de cette communication est de réaliser une simulation numérique du comportement des ouvrages dans des sols à faible capacité portante en tenant compte des interactions entre le comportement hydraulique et mécanique du sol. L'amélioration de la qualité des sols est aujourd'hui possible par de nombreuses techniques, notamment les techniques de renforcement par des géosynthétiques. Les géosynthétiques peuvent être modélisés à l'aide d'éléments de structure de type poutre, câble ou bande. L'utilisation de tels éléments nécessite de spécifier les caractéristiques du géosynthétique, tel que le module d'élasticité, la densité, l'aire de la section, l'inertie, la raideur... Ces éléments intègrent ou sont associés à des interfaces qui permettent de prendre en compte les caractéristiques aux interfaces géosynthétiques. Ce qui rend possible la modélisation des ouvrages constitués par des lits de géosynthétiques. Les géosynthétiques permettent d'améliorer les caractéristiques du sol en question, car ces premiers possèdent une grande capacité à la traction ce qui est quasi nul dans les sols. Ce type de traitement pourra être opté dans différents contextes tels que les chaussées, les pentes et les murs de soutènement.

2.1 Amélioration de la capacité portante

Les géosynthétiques de renforcement sont utilisés pour améliorer la capacité portante des sols sous les routes et autres infrastructures routières. Ils fonctionnent en renforçant la fondation en répartissant les charges appliquées sur la route, ce qui réduit les déformations et l'affaissement. Ils réduisent les déformations sous les charges lourdes (comme le trafic routier) en redistribuant la pression sur une plus grande surface. Cela permet de construire des routes sur des sols plus faibles tout en assurant leur stabilité.

Les recherches effectuées dans le cadre de ce travail dont on cherche à optimiser les propriétés mécaniques et le dimensionnement. Ainsi le comportement d'interface d'un géosynthétique. Ces caractéristiques mécaniques, prises en compte lors du dimensionnement, sont en général associées à des coefficients de sécurité liés à la durabilité du géosynthétique (mise en œuvre, vieillissement, fluage). Le dimensionnement des géosynthétiques peut être optimisé de manière innovante en ajustant la raideur du renforcement à son taux de déformation, ou en minimisant les facteurs de sécurité par l'association d'un système d'alerte basé sur la mesure des déformations.

2.1.1 Modèle numérique

L'étude numérique a été réalisée de disposer horizontalement les nappes de géosynthétiques au sein du remblai. Le comportement élastique parfaitement plastique a été adopté pour les sols considérant le critère de Mohr-Coulomb avec une règle d'écoulement associé. Les résultats montrent que l'accroissement de la raideur de géosynthétique augmente la capacité portante du sol sous l'influence de la variation de nombre des nappes de géosynthétiques et leurs emplacements. Il a permis de réduire considérablement les déplacements. Les résultats de cette recherche sont comparés aux résultats d'autres auteurs disponibles dans la littérature.

L'influence de la raideur et le nombre des nappes de géosynthétiques

L'amélioration du comportement du sol de renforcement est associée à une augmentation du module de rigidité du géotextile. La diminution des déplacements verticaux sous la fondation fait croire, de manière implicite, la capacité portante. Cette performance est due à l'adhérence entre la couche géotextile et le sol. Cela mobilise le frottement latéral,

donnant au sol un confinement supplémentaire et freinant le déplacement vertical. Le rapport de portance en fonction du déplacement vertical pour deux modules de rigidité du géotextile est illustré à la figure 2. Le géotextile GEO1 s'est avéré avoir une capacité portante inférieure par rapport à GEO2. L'utiliser 4 couches au lieu de 3 améliorera grandement la portance [1].

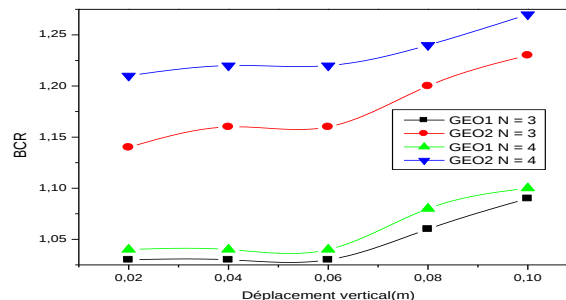


Figure 2. Variation de facteur d'amélioration avec le déplacement (EA, N variables) [1].

Validation de modèle numérique

Les résultats numériques obtenus ont été comparés à ceux des expériences de Patra et al [2], Qiming Chen [3], Madhavi et al [4]. Le tableau 1 montre les meilleures comparaisons de paramètres effectués pour trouver la meilleure position et configuration des couches de géotextile. La profondeur de la première nappe de géotextile (u), l'espacement vertical entre les couches (h) et la largeur de la nappe (b), maximisent la capacité portante et réduisent le tassement.

Tableau 1. Résultats des recherches antérieures pour les paramètres optimaux.

	Patra et al (2005)	Qiming Chen (2007)	Latha et al (2009)	La présente étude
Type de semelle	Filante	Rectangulaire	Carré	Filante
Type de renforcement	Géogridde	Géogridde	Géogridde	Géotextile
(u/B)opt	0.35	0.33	-	0.3
(h/B)opt	0.25	0.33	0.4	0.3
(b/B)opt	5	5	4	4

2.2 Modélisation hydromécanique

2.2.1 Position du problème

A partir d'une étude géotechnique complémentaire sur certaines parties du site destinées à la réalisation du projet du tramway Sidi Bel Abbès, la zone IS21 a été identifiée comme une zone qui se singularise par la présence d'une zone marécageuse permanente. En effet, cette zone en forme de cuvette, constitue un couloir de collecte et de circulation des eaux, celles-ci ne pouvant pas s'infiltrer efficacement en profondeur, du fait de la présence d'un substratum marneux imperméable. La solution retenue en zone marécageuse (figure.3) est de réaliser des systèmes de drainage avec un géotextile et des graviers non traités pour éliminer les risques inhérents à la présence d'eau et à l'utilisation de matériaux d'excavation non adaptés pour constituer une base selon des spécifications contractuelles et normatives. La granulométrie de ce matériau permettra également de ne pas obstruer l'écoulement naturel de l'eau. [5]

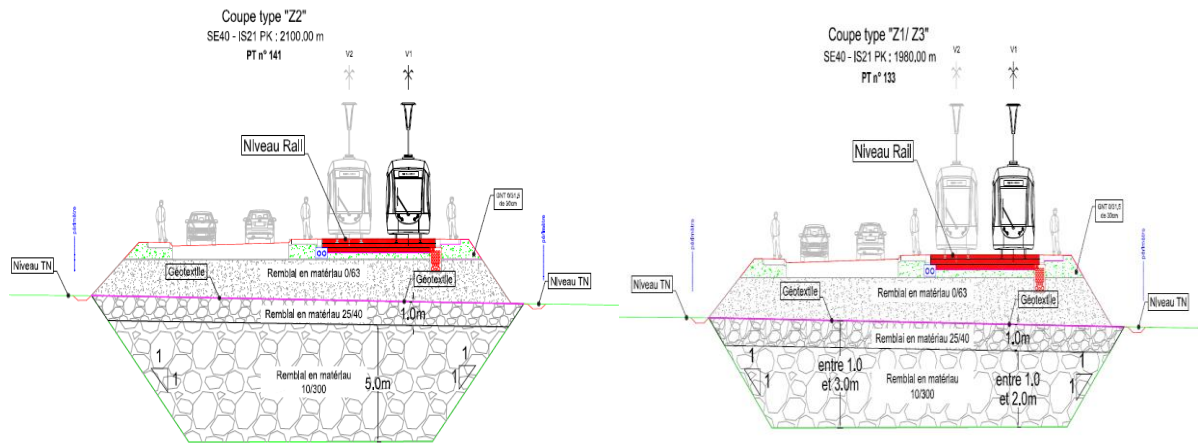


Figure 3. La solution retenue en zone marécageuse avec géotextile (fournie par l'entreprise métro d'Alger (EMA))

2.2.2 Théorie de couplage hydromécanique

En raison de l'interaction entre le squelette du sol et d'autres phénomènes de transport, une méthode couplée est essentielle pour décrire le comportement et la réponse réels dans les processus multiphysiques. La première théorie à considérer l'effet de couplage hydromécanique sur le sol a été le modèle de consolidation unidimensionnel introduit par Terzaghi en 1923. Plus tard, Biot (1941) a étendu la théorie de Terzaghi pour considérer la consolidation tridimensionnelle. La théorie de Biot présentait un ensemble d'équations de bilan énergétique appelées équations poroélastiques. Dans le cadre d'un comportement hydromécanique couplé, la contrainte dans les matériaux poreux provoque une variation volumétrique de la déformation, ce qui provoque la diffusion du fluide. Par conséquent, la pression interstitielle se dissipe à travers les pores, ce qui entraîne la consolidation du matériau poreux. Le modèle de couplage des milieux poreux saturés ou insaturés est progressivement développé sur la base de l'équation d'équilibre des contraintes, de l'équation de continuité d'infiltration et du principe de contrainte effective de Biot [6] [7] avec l'application généralisée de la théorie du couplage hydromécanique. Une connaissance approfondie de l'interaction entre le squelette du sol et l'eau par couplage multiphysique est nécessaire pour résoudre de nombreux défis d'ingénierie géotechnique.

Processus mécanique

La pression de l'écoulement à travers les pores du sol affecte les contraintes et les déformations dans le squelette du sol. Ici, une analyse de ce phénomène est introduite avec le concept de contrainte effective.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \alpha p \delta_{ij} \quad (1)$$

Où σ'_{ij} est la contrainte effective, σ_{ij} est la contrainte totale et α est le coefficient de Biot-Willis [8].

La relation entre le déplacement et les petites déformations peut être exprimée comme suit :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

Où ϵ_{ij} est la composante de la déformation et u est la composante du déplacement.

La relation contrainte-déformation pour un matériau élastique linéaire est sous la forme suivante :

$$\sigma'_{ij} = \lambda \epsilon v \delta_{ij} + 2G \epsilon_{ij} \quad (3)$$

Où ϵv est la déformation volumétrique du squelette, G est le module de cisaillement, λ est le module de Lamé et

$\epsilon v = \epsilon x + \epsilon y + \epsilon z$ est la déformation volumétrique.

La formule d'équilibre des contraintes est la suivante :

$$\sigma'_{ij} = 0 \quad (4)$$

En combinant des formules. La différenciation de (1)-(4) par rapport à x , y et z donne la fonction de déplacement comme une équation mécanique de la théorie poroélastique linéaire de Biot. En supposant une élasticité linéaire du squelette poreux (La loi de Hooke) on aura :

$$\left(\frac{G}{1-2\nu} + G \right) \nabla^2 \epsilon_v - \alpha \nabla^2 p = 0 \quad (5)$$

Où ν est le coefficient de Poisson.

Processus hydraulique

L'écoulement de l'eau à travers un sol saturé est généralement décrit à l'aide de la loi de Darcy (1856) qui régit l'écoulement des fluides dans les matériaux poreux ; Il s'agit d'une équation de transfert d'énergie qui relie le débit du fluide à la pression et au gradient d'élévation, comme indiqué dans l'équation suivante :

$$q = -\frac{k}{\gamma_m} \nabla(p - \rho_f g z) \quad (6)$$

Où q est le flux de fluide, k est la perméabilité intrinsèque, ρ_f est la densité du fluide, g est l'accélération gravitationnelle, z est la cote et γ_m est le poids spécifique du fluide, définie comme $\gamma_m = \rho_f g$. Puisque la loi de Darcy est une équation de transfert d'énergie, l'écoulement du fluide dû à de l'énergie potentielle est exprimé comme "la force de frottement entre le fluide et la matrice solide équilibre la force motrice due au gradient du potentiel". La vitesse d'infiltration v est donc exprimée comme la vitesse linéaire moyenne entre les déplacements du fluide et de la matrice solide [9] :

$$v = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho_f g \nabla z) \quad (7)$$

Où μ est la viscosité du fluide.

Processus couplé

L'écoulement et les processus géomécaniques interagissent constamment [10]. Le modèle actuel considère la relation entre la déformation volumétrique ε_v et la perméabilité k . Cette relation inclut la porosité n donnée par [11]:

Où n_0 est la porosité initiale.

$$n = \frac{1}{1 + \varepsilon_v} (n_0 + \varepsilon_v) \quad (8)$$

L'équation de Kozeny-Carman décrit la relation entre la perméabilité et la déformation volumétrique à température constante [12] :

$$k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0} \right) \quad (9)$$

Où k_0 est la perméabilité initiale.

L'équation (9) montre que la perméabilité augmente avec l'augmentation de la déformation. Pour coupler les modèles d'écoulement et géomécanique, la perméabilité est liée à la déformation volumétrique par sa relation avec la porosité.

2.2.3 Simulation numérique de couplage hydromécanique

Dans N. Yalaoui et al [5] ont examiné et démontré les avantages de l'utilisation des géosynthétique pour un modèle hydromécanique pour estimer la déformation et la pression de l'eau interstitielle. Pour illustrer les effets hydromécaniques, un modèle numérique basé sur le concept poroélastique de Biot a été développé à l'aide de COMSOL, Cette étude examine l'effet de géotextile sur la déformation volumique et le stockage d'eau sur le comportement de la plate-forme de tramway, la figure 4 montre l'évolution de la teneur en eau volumétrique. Des changements significatifs dans la teneur en eau volumétrique sont observés dans les deux profils sol et sol-géotextile. Ce résultat indique que le géotextile est efficace pour empêcher l'écoulement vertical de l'eau en raison de la différence de conductivité hydraulique des deux matériaux. L'augmentation de la teneur en eau volumétrique dans le profil sol-géotextile a été entravée, mais a augmenté plus rapidement que dans le profil de sol .donc Les changements de pression interstitielle affectent les changements dans les propriétés mécaniques des matériaux. La variation de la teneur en eau volumétrique et la modification de l'eau interstitielle sont dues à la déformation volumétrique et la faible compressibilité, les charges externes sont complètement absorbées par la phase eau et la déformation volumétrique du squelette du sol égale aux changements de la teneur en eau volumétrique.

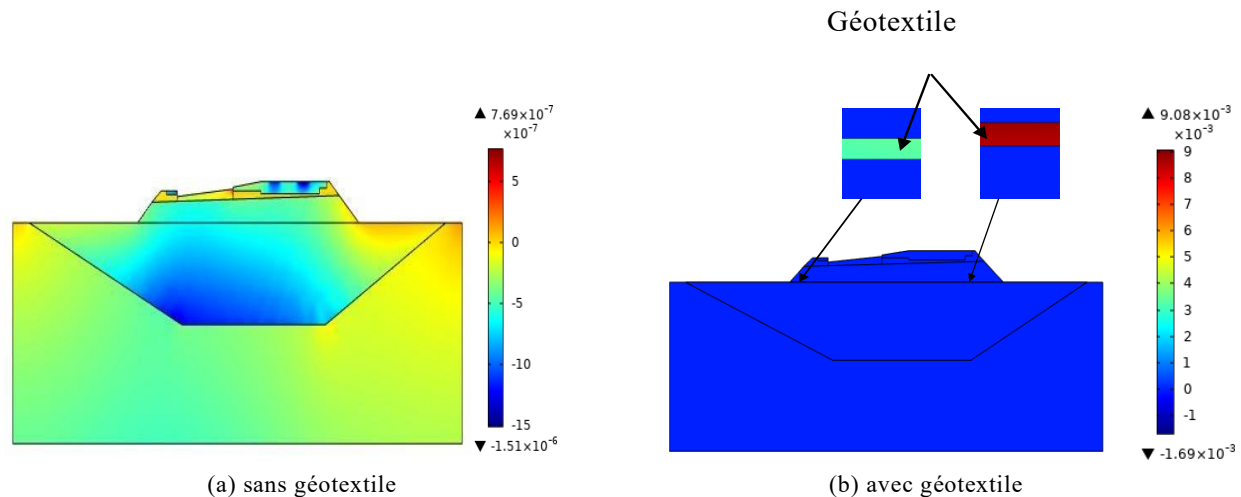


Figure 4. Distribution de déformation volumétrique [5]

La figure 5 montre la répartition du stockage de l'eau avec et sans géotextile. Il y a une augmentation significative du stockage de l'eau dans le géotextile par rapport au sol. [ZOR 10b] a fait une observation similaire. Il a été démontré que les barrières capillaires géosynthétiques offrent une meilleure rétention d'eau que le sol seul. De plus, il offre les avantages de séparation et de filtration nécessaires à la performance supérieure à long terme des barrières capillaires dans les sols granulaires. Cela indique que la gamme de distributions de tailles de pores de ces matériaux augmente considérablement la capacité de stockage d'eau de géotextile par rapport au sol.

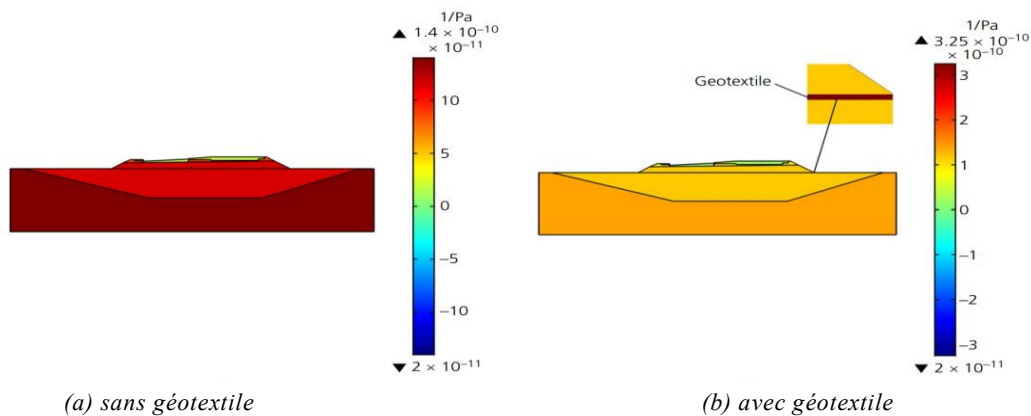


Figure 5. Le stockage de l'eau [5]

3. CONCLUSION

Diverses modélisations numériques ont été réalisées, pour évaluer les performances des géosynthétiques dans différentes applications géotechniques. D'abord une étude paramétrique réalisée pour vérifier l'effet d'un renforcement avec des géotextiles. Ensuite ; une analyse multiphysique dans le cas d'ouvrage géotechnique sous sollicitations hydromécaniques avec la présence d'une couche de géotextile.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ✓ Les géotextiles améliorent généralement le comportement granulaire du sol, augmentent la capacité portante et réduisent le tassement sous fondations. Ceci est vrai quelle que soit la valeur de rigidité de la couche de géotextile. Celles-ci sont dues aux contraintes de cisaillement générées entre les couches de sol et de géotextile, assurant une résistance à la traction horizontale et minimisant le déplacement vertical.

- ✓ La capacité portante est augmentée en augmentant le nombre de couches de renforcement et la rigidité de géotextile. Le coefficient BCR diminue au fur et à mesure que la distance verticale entre les couches de renforcement augmente.
- ✓ La distance optimale (h) entre les couches de géotextile est estimée à environ un tiers de la largeur de la fondation ($h/B = 0,3$). L'espacement optimal du système de renforcement nécessite également l'espacement de la première couche $u = 0,3B$.
- ✓ Les géotextiles induisent des changements de pression interstitielle qui ce qui modifient le champ hydraulique et provoquent des déformations.
- ✓ Malgré que la déformation du géotextile fût significative, le changement de la pression interstitielle reste identique.
- ✓ Une perte de la charge hydraulique correspond à une perte des forces de frottement dans le sol et les pores du géotextile.
- ✓ Le stockage de l'eau due à la présence des géotextiles est augmenté par rapport au sol en raison de la gamme de distribution différente à cause de la taille des pores de ces matériaux.
- ✓ Le géotextile réduise les remontées d'eau. Cela peut grandement affecter le mouvement de l'eau et provoquer une redistribution du profil de l'eau.

Ce travail montre aussi la performance des méthodes de couplage numérique.

4 . REFERENCES

- [1] N. Yalaoui, H.Trouzine, M. Meghachou, T. Miranda, Geotextile Reinforced Strip Footing: Numerical Modeling and Analysis. Mathematical Modelling of Engineering Problems. April, (2023). Vol. 10, No. 2, pp. 398-404. <https://doi.org/10.18280/mmep.100.202>.
- [2] C. R. Patra, B. M. Das, C. Atalar, Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand. Geotextile and Geomembrane, 23, (2005) 454-462.
- [3] Q. Chen, An experimental study on characteristics and behavior of reinforced soil foundation. PhD dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge, USA. (2007).
- [4] G.M. Latha, A. Somwanshi, Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand. Geotextiles and Geomembranes, (2009) 27(4): 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.02.001>.
- [5] N. Yalaoui, H.Trouzine, M. Meghachou, H.A. Boussad, S.M. Aissa Mamoune, Multiphysics Analysis of Tramway Geotechnical Infrastructure: Numerical Modeling. Engineering and Computational Mechanics (Proceedings of the ICE). June, (2023). V176(2), pp.50-64. <https://doi.org/10.1680/jencm.22.00044>.
- [6] W.G Li. and Q.Yang , “Hydromechanical constitutive model for unsaturated soils with different over consolidation ratios”. International Journal of Geomechanics (2018). 18(2): 04017142.
- [7] R.H. Wang ,Q. Zhang and X.Z. Xia “ Fully coupled modeling of fractured saturated porous medium using extended finite element method”. Rock and Soil Mechanics. (2017). 38(5): 1–9.
- [8] A. Ghiriani and M. Fall, Coupled thermo-hydro-mechanical- chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments: part II: mechanical, chemical and microstructural processes and characteristics. Engineering Geology.(2014) . 170: 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.004>.
- [9] H.F. Wang .Theory of Linear Poroeasticity. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA,(2000) . 287p.
- [10] C.R. McKee, A.C. Bumb, R.A.J. Koenig ,Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations. SPE Formation Evaluation .(1988) .3, 81–91.
- [11] R. Qiquan ,Study on dynamic models of reservoir parameters in the coupled simulation of multiphase flow and reservoir deformation. Petroleum Exploration. (1997) . 24(2): 61–65.
- [12] J. Kozeny Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsber Akademie der Wissenschaften in Wien. (1927) . 136(2a): 271–306.