

ANALYSE DU SOULÈVEMENT DES FONDATIONS SUPERFICIELLES DANS UN MASSIF DE SOL GONFLANT : APPROCHE ANALYTIQUE ET MODÉLISATION NUMÉRIQUE 3D

HEAVE ANALYSIS OF SHALLOW FOUNDATIONS IN A SWELLING SOIL MASS: ANALYTICAL APPROACH AND 3D NUMERICAL MODELING

Réception : 23/01/2021

Acceptation : 30/11/2021

Publication : 15/01/2022

KHENNOUF Abdelaziz¹, BAHEDDI Mohamed²

¹Département de Génie Civil, Université Mostefa Ben Boulaïd, Batna 05000, Algérie, Khenouf.abdelaziz@gmail.com

²Département de Génie Civil, Université Mostefa Ben Boulaïd, Batna 05000, Algérie, m.baheddi@univ-batna2.dz

Résumé - L'humidification des sols argileux gonflants induit une augmentation importante du volume du sol qui produira donc un soulèvement différentiel des fondations superficielles. Pour cette raison, cet article rapporte un ensemble de résultats d'étude analytique et numérique à l'aide du code de calcul aux éléments finis PLAXIS 3D, effectué sur une fondation superficielle ancrée dans un massif de sol gonflant. Les résultats numériques obtenus de soulèvement sont comparés avec les solutions analytiques proposées basées sur les essais œdométriques. En conclusion, les résultats obtenus montrent que le modèle numérique proposé a une bonne concordance avec les solutions analytiques et est capable de prédire le soulèvement des fondations superficielles.

Mots-clés : Gonflement, Sols argileux, Soulèvement, Modélisation numérique, Fondation superficielle

Abstract-The humidification of swelling clayey soils induces a significant increase in soil volume which, will therefore lead to a differential heaving of the shallow foundations. For this reason, this article reports a set of results of an analytical and numerical study using the finite element calculation code PLAXIS 3D, carried out on a shallow foundation set in a swelling soil mass. The numerical heave results obtained are compared with the proposed analytical solutions based on oedometric tests. Therefore, the results obtained show that the proposed numerical model has a good agreement with the analytical solutions and is able to predict the heave of the shallow foundations.

Keywords : Swelling, Clayey soil, Heave, Numerical modeling, Shallow foundation

1-Introduction

Un sol gonflant est généralement défini comme un sol qui a un potentiel d'augmentation de volume provoqué par l'augmentation de la teneur en eau [1, 2]. Les sols argileux sont constitués de minéraux variés dont la forte affinité pour l'eau est connue. Ils comportent une grande proportion de particules argileuses telles que la kaolinite, l'illite et la montmorillonite. Une humidification de ces minéraux à partir d'un certain état induit des gonflements importants, surtout la montmorillonite qui est à l'origine de la plupart des problèmes des sols gonflants [3].

On trouve des sols gonflants dans de nombreuses régions du monde, en particulier

dans les régions arides et semi-arides où des conditions humides apparaissent après de longues périodes de sécheresse [4, 5]. La littérature comporte de nombreuses études liées aux problèmes des argiles gonflantes [2, 3, 6]. L'Algérie, à l'instar des pays à climat sec, souffre également du problème de gonflement des sols non saturés. Des cas de désordres sont déclarés ces dernières années dans plusieurs régions du pays (Msila, Batna, Tlemcen, Oran, Médéa...) [7-11]. L'interaction sols-structures est assurée par les fondations qui jouent le rôle important de transfert des charges vers le sol support argileux. Cependant, les déformations de gonflement des sols argileux se produisent dans le massif du sol au cours du temps [12]. Ces déformations produiront donc un soulèvement différentiel des fondations

superficielles. Le soulèvement est déterminé en fonction de la pression de gonflement et la contrainte totale distribuée avec la profondeur dans le sol [13].

Des études numériques en élément finis 2D des fondations superficielles sur un sol non saturé gonflant sont rapportées dans la littérature par plusieurs chercheurs [14 –18]. Ils ont mené une étude hydro-mécanique pour estimer l'effet du chemin séchage-humidification sur le retrait et le soulèvement des fondations superficielles. En revanche, des études limites fournissent les détails sur le comportement des fondations superficielles sur des sols gonflants en utilisant la modélisation numérique en 3D [19 –20]. Ainsi, la majorité des structures endommagées à faible rigidité sont basées sur ce type de fondations superficielles. Toutes ces raisons nous ont fait choisir le sujet traité dans cette étude. L'objectif de cette étude est d'analyser le soulèvement des fondations superficielles isolées (semelle carrée, rectangulaire ou circulaire) et semelle filante reposant sur un massif de sol gonflant homogène de la région de N'Gaous. Une approche analytique basée sur l'état de contrainte dans le sol a été proposée pour calculer le soulèvement total. Ensuite, un modèle numérique tridimensionnel a été proposé pour analyser le soulèvement total à l'aide du code d'éléments finis PLAXIS 3D [21]. Les résultats numériques obtenus ont été comparés aux résultats analytiques proposés dans la littérature.

2- Propriétés de l'argile gonflante

L'argile gonflante étudiée provient de la région de N'Gouas qui est située à 77 km à l'ouest de Batna, Algérie. Le choix de ce site est justifié par l'apparition de plusieurs pathologies dans les constructions pendant ces dernières années dans cette région. Les propriétés physiques d'échantillons du sol sont rassemblées dans le tab.1. Le sol a été classé comme une argile limoneuse à forte teneur en plastique (CH), conformément au Système unifié de Classification des Sols (USCS). Les résultats expérimentaux obtenus à l'aide de l'œdomètre unidimensionnel conventionnel selon la norme ASTM D 4546-03 [22] ont produit diverses courbes. Parmi elles, l'amplitude de gonflement en fonction du temps (Fig.1) et la variation de la

teneur en eau après le gonflement en fonction de la pression verticale appliquée (Fig.2).

Tableau 1 : propriétés physiques des échantillons de sol intact

Table 1: Physical properties of undisturbed soil samples

Propriétés	Symboles	Valeurs
Limit de liquidité	W_L	72.28 %
Limit de plasticité	W_p	29.20 %
Indice de plasticité	I_p	43.08 %
Poids volumique sec	γ_d	17.52 kN/m ³
Densité spécifique	G_s	2.74
Teneur en eau	W_n	14.1 %
Degré de saturation	S_r	80.82 %
Teneur en argile	C2 μ m	71 %
Teneur en fine	C80 μ m	98.90 %

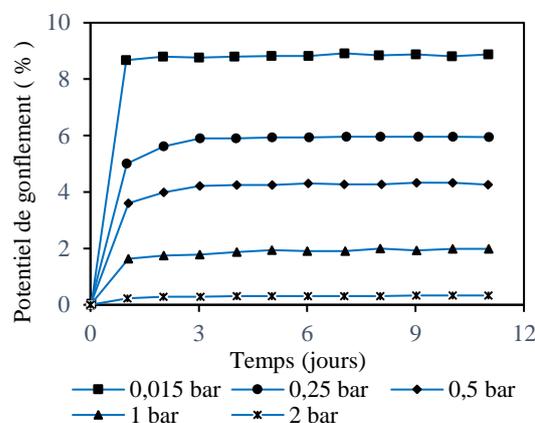


Figure 1 : Variation de l'amplitude de gonflement en fonction du temps

Figure 1 : Variation of the swelling amplitude as a function of time

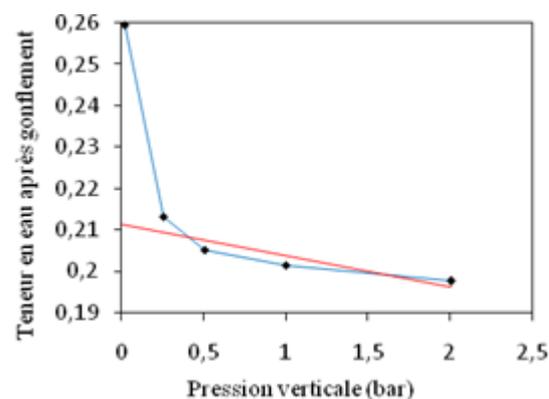


Figure 2 : Teneur en eau après gonflement en fonction de la pression verticale

Figure 2 : Water content after swelling as a function of vertical pressure

3- Prédiction du soulèvement total

Dans les calculs de soulèvement des fondations superficielles, une simple approche basée sur l'état de contrainte du sol sous la fondation peut être utilisée, qui est représentée par la somme de la contrainte géostatique $\sigma_{z,g}$ donnée par Eq. (1) et de la contrainte due à la surcharge $\sigma_{z,charge}$ (Eq.2) [23].

$$\sigma_{z,g} = \gamma \times z \quad (1)$$

$$\sigma_{z,charge} = \sigma_0 e^{-\frac{1}{2}z\left(\frac{1}{B} + \frac{1}{L}\right)} \quad (2)$$

Où : σ_0 est la contrainte verticale au niveau de la fondation, B est la largeur de la fondation, L est la longueur de la fondation, z est la profondeur considérée sous le niveau de fondation et γ est le poids volumique du sol.

La déformation de gonflement se produit dans le massif du sol lorsque la contrainte totale $\sigma_{z,t}$ est inférieure à la pression de gonflement σ_g (Eq.3).

$$\sigma_{z,t} = \sigma_{z,g} + \sigma_{z,charge} < \sigma_g \quad (3)$$

Baheddi et al. [24] sur la base des résultats de recherches expérimentales proposent un modèle pour prédire le potentiel relatif de gonflement du sol, représenté par l'Eq. (4).

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta d_z}{d_z} = \varepsilon_g^0 \left(1 - \frac{\sigma_{z,t}}{\sigma_g}\right) \quad (4)$$

$$\left[(\bar{w}_g - w_n) - \chi \sigma_{z,t}\right]$$

Où : ε_g^0 est la déformation relative de gonflement sans chargement, \bar{w}_g est la teneur en eau initiale du sol gonflant sans chargement, w_n est la teneur en eau naturelle du sol et χ la pente de la courbe de la fig. 2. Les valeurs obtenues sont : $\chi = 0,007 \text{ bar}^{-1}$, $\bar{w}_g = 0,212$

Mathématiquement, l'Eq. (4) peut être simplifiée et représentée par l'Eq. (5).

$$\varepsilon_g = b_0 - b_1 \sigma_{z,t} + b_2 \sigma_{z,t}^2 \quad (5)$$

où les coefficients b_0 , b_1 et b_2 représentent les propriétés importantes de gonflement des sols. Ils sont donnés comme suite : $b_0 = \varepsilon_g^0 (\bar{w}_g - w_n)$ $b_1 = \left(\frac{\varepsilon_g^0}{\sigma_g}\right) [(\bar{w}_g - w_n) + \chi \sigma_g]$; $b_2 = \frac{\varepsilon_g^0}{\sigma_g} \chi$

La valeur finale du soulèvement de la fondation dû au gonflement de la couche de sol sera représentée par l'Eq. (6).

$$S_g = \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} \varepsilon_g(\sigma_{z,t}) dz \quad (6)$$

où : Z_{i+1} et Z_i représentent les limites supérieure et inférieure de la couche du sol gonflant respectivement.

Pour une semelle carrée $B = L$ avec encastrement D_f , lorsque toutes les couches du sol sont constituées d'argile gonflante, $\sigma_{z,t} \leq \sigma_g$ et conformément à l'hypothèse de $Z_i = 0$ et $Z_{i+1} = H$ de l'intégration de Eq. (6) nous obtenons Eq. (7).

$$\begin{aligned} S_g = & (b_0 - b_1 \gamma D_f + b_2 \gamma^2 D_f^2) H \\ & - \frac{1}{2} \gamma (b_1 - 2b_2 \gamma D_f) H^2 + \frac{1}{3} b_2 \gamma^2 H^3 \\ & + B \sigma_0 (b_1 - 2b_2 \gamma D_f) \left(e^{-\frac{H}{B}} - 1\right) \\ & + \frac{1}{2} B b_2 \sigma_0^2 \left(1 - e^{-\frac{2H}{B}}\right) \\ & + 2B b_2 \gamma \sigma_0 \left[(B - (H + B)e^{-\frac{H}{B}}]\right] \end{aligned} \quad (7)$$

3.1- Formule proposée

Une autre formule est envisagée dans cette étude (Eq. 9) basée sur le modèle proposé par Baheddi et al. [24]. La seule nouveauté est de remplacer la distribution des charges en profondeur par la relation de Holtz et Kovacs [25] (Eq. 8). Ce remplacement de la contrainte due à la surcharge a pour but d'obtenir une autre équation plus simple de prédiction du soulèvement par rapport à Eq. (7).

$$\sigma_{z,charge} = \frac{\sigma_0 \cdot B \cdot L}{(B+Z) \cdot (L+Z)} \quad (8)$$

Le soulèvement total d'une fondation carrée dû au gonflement de la couche du sol sera représenté par Eq. (9).

$$S_g = (b_0 - b_1 \gamma D_f + b_2 \gamma^2 D_f^2) H - \frac{1}{2} \gamma (b_1 - 2b_2 \gamma D_f) H^2 + \frac{1}{3} b_2 \gamma^2 H^3 - b_1 \sigma_0 B^2 \left[\frac{-1}{(B+H)} + \frac{1}{B} \right] + \frac{b_2 \sigma_0^2 B^4}{3} \left[\left(\frac{-1}{(B+H)^3} + \frac{1}{B^3} \right) \right] \quad (9)$$

4- Procédure de modélisation numérique

4.1- Géométrie et maillage du modèle

L'étude numérique de ce problème a été faite par le code de calcul aux éléments finis PLAXIS 3D. Nous avons étudié le comportement d'une fondation superficielle carrée rigide en béton de largeur $B = 1m$ et un encastrement $D_f = 1m$. Cette fondation est soumise à un chargement vertical répartie σ_0 croissant de 0 jusqu'à 500 kPa. Le modèle est étendu dans les deux directions horizontales $L_x = 50m$, $L_y = 30m$ et une hauteur totale $H = 11m$ (Fig.3). Pour les conditions aux limites, la base du modèle est bloquée dans toutes les directions et les déplacements horizontaux nuls dans le sens x et y sur les faces latérales du massif de sol.

La discrétisation du modèle a été faite par des éléments triangulaires à 10 nœuds. La finesse du maillage a été réglée sur médium avec un raffinement local de zone la plus sollicitée et déformée, c'est-à-dire au voisinage de la fondation et sous sa base. La taille du maillage a été limitée à $0,125 B$ à la surface de la semelle et près du bord de la semelle. Cependant, la zone raffinée est étendue dans les trois directions sur les bords de la semelle $1 \times 1m$, cela garantit la précision dans le modèle numérique. Le maillage est constitué en totalité de 10473 éléments et 15431 nœuds.

4.2- Modèle de comportement

Le béton de la semelle suit un comportement de type élastique linéaire soumis à

des contraintes isotropiques ($E = 30 \text{ GPa}$, $\nu = 0,15$). Le comportement de l'argile gonflante est régi par une loi linéaire élastique parfaitement plastique représentée par le critère de rupture Soft Soil Creep Model (SSC). Les paramètres de compressibilité de ce modèle (indice de compression, indice de gonflement et indice de fluage) ont été déterminés par l'essai de compressibilité à l'oedomètre. D'autre part, les paramètres de résistance (cohésion, angle de frottement et angle de dilatance) ont été déterminés par l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande en condition drainée. Le tab. 2 fournit les paramètres du modèle utilisé dans la simulation.

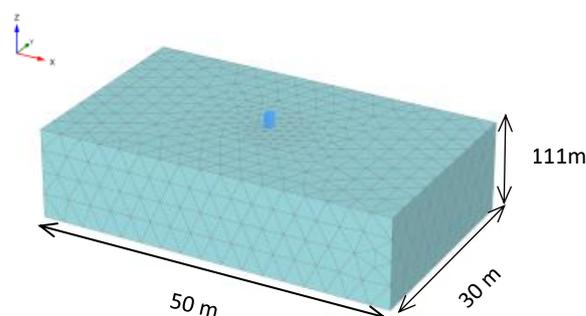


Figure 3 : Géométrie et maillage du modèle

Figure 3: Geometry and mesh of the model

4.3- Interface et condition initiale

La semelle est en contact avec le sol par l'élément interface. La rugosité de l'interaction a été modélisée en choisissant une valeur appropriée pour le facteur de réduction de la résistance dans l'interface R_{int} . Ce facteur relie les paramètres de résistance de l'interface avec les paramètres de résistance du sol par les équations suivantes :

$$C'_{int} = R_{int} \cdot C'_{sol} \quad (10)$$

$$\tan \phi'_{int} = R_{int} \cdot \tan \phi'_{sol} \quad (11)$$

où : C'_{sol} et ϕ'_{sol} sont la cohésion et l'angle de frottement du sol respectivement. C'_{int} et ϕ'_{int} sont la cohésion et l'angle de frottement de l'interface. Dans notre étude, l'angle de frottement d'interface $\delta = 18^\circ$ correspond à un facteur de réduction de la résistance $R_{int} = 0,7$.

Tableau 2 : Paramètres du modèle SSC utilisé dans la modélisation

Table 2: Parameters of the SSC model used in the modeling

Paramètres	Symboles	Valeurs
Poids volumique sec	γ_d (KN/m ³)	17.52
Poids volumique saturé	γ_{sat} (KN/m ³)	20
Indice de gonflement modifié	κ^*	0.034
Indice de compression modifié	λ^*	0.044
Indice de fluage	μ^*	2.93×10^{-7}
Coefficient de Poisson	ν_{ur}	0.15
Cohésion	C' (kPa)	80
Angle de frottement	φ' (°)	25
Angle de dilataance	ψ (°)	0

Pour les conditions initiales, une pression de l'eau négative égale 218kPa est appliquée dans le modèle pour simuler la pression de gonflement de la couche d'argile. Cette pression de gonflement a été obtenue expérimentalement par l'essai de gonflement selon la norme ASTM D 4546-03 (courbe de l'amplitude de gonflement en fonction de la pression verticale appliquée). Ensuite, les contraintes horizontales initiales sont générées en utilisant $K_0 = 1,66$. Cette valeur de K_0 est calculée en fonction d'une corrélation empirique par Wroth [26] pour les sols faiblement surconsolidés où $K_0 = K_{nc} \cdot OCR - \frac{\nu}{1-\nu} (OCR - 1)$. Néanmoins, le calcul plastique est effectué en condition drainée.

5- Résultats et discussion

5.1- Soulèvement total

La figure 4 montre les contours du déplacement vertical (soulèvement) du massif du sol après le gonflement et pour $\sigma_0 = 300$ kPa. Le soulèvement est maximal à la surface de la masse du sol (65 mm), puis il diminue avec la profondeur jusqu'à une valeur nulle à la base. On peut voir aussi un soulèvement faible sous la base de la semelle en raison de fortes contraintes de charge dans cette zone. D'après ces résultats numériques, on observe que le soulèvement de la semelle est non uniforme. Il est minimal au centre et maximal au bord de la semelle pour tous les cas de chargement.

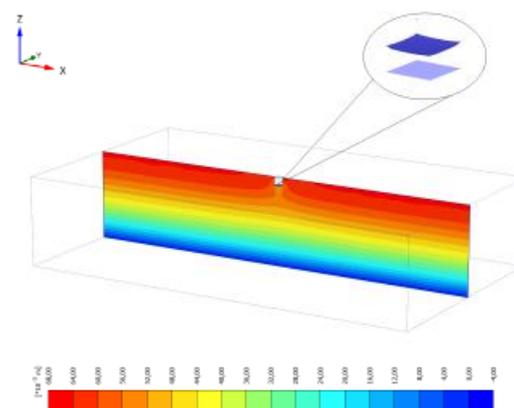


Figure 4 : Contours du soulèvement après le gonflement et le chargement pour $\sigma_0 = 300$ kPa, coupe transversale

Figure 4: Contours of the heave after swelling and loading for $\sigma_0 = 300$ kPa, cross section

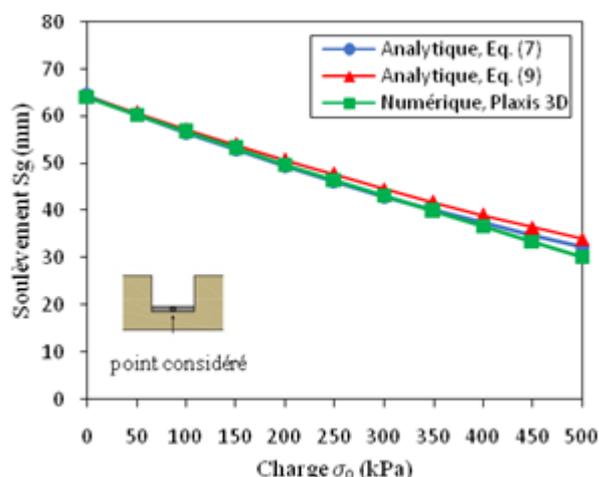


Figure 5 : Comparaison des résultats de soulèvement S_g obtenue par les analyses analytiques et numérique

Figure 5: Comparison of the heave results S_g obtained by analytical and numerical analysis

La figure 5 montre le soulèvement S_g obtenu par l'approche analytique et numérique au centre de la fondation pour diverses charges verticales σ_0 . On constate dans le graphe qu'il y a une diminution du soulèvement avec l'augmentation de la charge sur la semelle. Ainsi, une concordance entre les résultats analytiques et ceux obtenus numériquement avec une différence d'environ 2 %. L'une des

implications importantes de ces résultats est que la semelle continue de se soulever lorsque la charge appliquée dépasse la pression de gonflement 218 kPa. Cela en raison de la nullité de la déformation de gonflement en un point situé à la profondeur z de la masse du sol.

Le tableau 3 résume les résultats analytiques et numériques de la prédiction du soulèvement total S_g pour différents types de fondations

superficielles isolées (semelle rectangulaire et circulaire) ainsi que les fondations continues (semelle filante) soumises à des charges σ_0 variant de 0 à 500 kPa par incrément de 100 kPa. En comparant les résultats obtenus, on remarque que les résultats numériques pour les semelles rectangulaire, circulaire et filante sont en bon accord avec les solutions analytiques.

Tableau 3 : Soulèvement total pour une semelle rectangulaire, circulaire et filante à partir d'analyses numériques et analytiques

Table 3: Total heave for a rectangular, circular and continuous footing from numerical and analytical analysis

Type de fondations	Soulèvement total S_g (mm)	Charge appliquée σ_0 (kPa)					
		0	100	200	300	400	500
Rectangulaire (B=1m, L=2m)	Analytique	64.3	55.1	46.5	38.6	31.3	24.6
	Numérique	63.4	54.7	46.0	37.6	29.5	21.4
Circulaire D=1.7m	Analytique	64.3	53.3	43.2	33.8	25.2	17.5
	Numérique	63.4	54.0	44.5	35.4	26.7	18.0
Filante (B=1m, L=10m)	Analytique	64.3	46.9	30.8	15.9	2.43	-9.82
	Numérique	63.4	49.7	37.1	25.2	13.9	3.00

6- Conclusion

Dans cet article, une analyse analytique et numérique a été effectuée pour calculer le soulèvement total des fondations superficielles ancrées dans un massif de sol argileux gonflant. Sur la base des résultats de cette étude, les conclusions tirées de ce travail sont les suivantes :

- Les résultats à l'aide du logiciel PLAXIS 3D montrent une capacité et une efficacité raisonnables du modèle numérique proposé pour prédire le soulèvement de la semelle sous une charge verticale;
- Les résultats des calculs numériques du soulèvement de la semelle sont compatibles avec les prédictions analytiques basées sur les essais œdométriques proposés ;
- Les résultats ont montré qu'en cas d'égalité entre la charge appliquée σ_0 et la pression de gonflement σ_g cela ne signifie pas une absence de soulèvement de la semelle S_g . Elle caractérise seulement la nullité de la déformation de gonflement en un point à la profondeur z du massif de sol.

Références bibliographiques

- [1] Nelson, J. D., and Miller, D. J. *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. J. Wiley, New York, 1992.
- [2] Nelson, J. D., Chao, K. C., Overton, D. D., and Nelson, E. J., Eds. *Foundation Engineering for Expansive Soils*. Wiley, Hoboken, New Jersey, 2015.
- [3] Chen, F. H., *Foundations on Expansive Soils*. Elsevier Scientific Pub. Co, Amsterdam; New York, 1975.
- [4] Khennouf, A., and Baheddi, M., *Comportement des constructions légères lors de gonflement du sol argileux.*, Proceedings du 4ème Colloque International Sols Non Saturés & Construction Durable, USTO, Oran-Algeria, 2018.
- [5] Dafalla, M., Al-Shamrani, M., and Al-Mahbashi, A., *Expansive Soil Foundation Practice in a Semiarid Region.*, Journal of Performance of Constructed Facilities ASCE, Vol. 31, No. 5, pp. 1-8, 2017.

- [6] Philipponnat, G., *Retrait-Gonflement Des Argiles, Proposition de Méthodologie.*, Revue Française de Géotechnique, No. 57, pp. 5–22, 1991.
- [7] Derriche, Z., Iguechtal, L., and Tas, M., *Comportement Des Ouvrages Dans Les Argiles Expansives d’In-Aménas.*, Revue Française de Géotechnique, Vol. 89, pp. 55–63, 1989.
- [8] Hachichi, A., and Fleureau, J. M., *Caractérisation et Stabilisation de Quelques Sols Gonflants d’Algérie.*, Revue Française de Géotechnique, Vol. 86, pp. 37–51, 1999.
- [9] Djedid, A., Bekkouche, A., and Aissa Mamoune, S. M., *Identification et Préviation Du Gonflement de Quelques Sols de La Région de Tlemcen (Algérie).*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 233, pp. 67–75, 2001.
- [10] Khemissa, M., and Mekki, L., *Problematic Soil Mechanics in the Algerian Arid and Semi-Arid Regions (Case of M’sila Expansive Clays).*, Proceedings of the 16 th African Regional Conference On Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Tunisia, 2015.
- [11] Medjnoun, A., Khatine, M., and Bahar, R., *Caractérisation Minéralogique et Géotechnique Des Argiles Marneuses Gonflantes de La Région de Médéa, Algérie.*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 73, No. 4, pp. 1259–1272, 2014.
- [12] Tang, A. M., Cui, Y. J., Trinh, V. N., Szerman, Y., and Marchadier, G., *Analysis of the Railway Heave Induced by Soil Swelling at a Site in Southern France.*, Engineering Geology, Vol. 106, No. 1, pp. 68–77, 2009.
- [13] Ejjaouani, H., *Interactions Des Fondations et Des Sols Gonflants : Pathologie, Calculs et Études Expérimentales.* Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
- [14] Hung, Q.V., and Fredlund, D. G., *Challenges to Modelling Heave in Expansive Soils.*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 43, No. 12, pp. 1249–1272, 2006.
- [15] Hung, Q.V., and Fredlund, D. G., *The Prediction of One-, Two-, and Three-Dimensional Heave in Expansive Soils.*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, No. 4, pp. 713–737, 2004.
- [16] Abed, A.A., *Numerical Modeling of Expansive Soil Behavior.* Phd Thesis, Stuttgart University, Stuttgart, Germany, 2008.
- [17] Mrad, M., Abdallah, A., Masrouri, F., and Vaunat, J., *Finite-Element Implementation of BExM Elastoplastic Model for Swelling Unsaturated Soils.*, ASCE, pp. 1932–1943, 2006.
- [18] Loukidis, D., Lazarou, G., and Bardanis, M., *Numerical simulation of swelling soil – mat foundation interaction.*, Proceedings du XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavík- Iceland, 2019.
- [19] Dafalla, M., Al-Shamrani, M., Puppala, A.J., and Ali, H.E., *Design guide for rigid foundation systems on expansive soils.*, International Journal of Geomechanics, Vol. 12, No. 5, pp. 528–536, 2011.
- [20] Shams, M. A., Shahin, M. A., and Ismail, M. A., *Simulating the behaviour of reactive soils and slab foundations using hydromechanical finite element modelling incorporating soil suction and moisture changes.*, Computers and Geotechnics, Vol. 98, pp. 17–34, 2018.
- [21] Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., and Swolfs, W.M., *Plaxis 3D Reference Manuel.*, Delft University of Technology and Plaxis by, Netherlands, 2013.
- [22] ASTM D 4546., *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils.*, West Conshohocken, PA, 2003.
- [23] Sadjin, V. S., *About the Model of Swelling Soils. Foundations and Underground Structures on Swelling Soils.*, 61. Strojizdat, 1971.
- [24] Baheddi, M., Djafarov, M., and Charif, A., *A Method for Predicting the Deformation of Swelling Clay Soils and Designing Shallow Foundations That Are Subjected to Uplifting.*



Acta Geotechnica Slovenica, Vol. 13, No. 1, pp. 67–77, 2016.

[25] Holtz, R. D., and Kovacs, W. D., *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.

[26] Wroth, C. P., *Correlations of Some Engineering Properties of Soils.*, Acta Informatica, Vol. 1, pp. 121–132, 1979.