

APPROCHE MATHÉMATIQUE SUR LA MÉTHODE DE BISHOP - RÔLE DES GÉOSYNTHÉTIQUES DANS LA STABILISATION DU TALUS DU PK (240+847) DE L'AUTOROUTE A1 (N-E ALGÉRIE)

MATHEMATICAL APPROACH ON THE BISHOP METHOD, ROLE OF GEOSYNTHETICS IN SLOPE STABILIZATION, OF PK (240 + 847)/A1 HIGHWAY

Réception : 15/09/2018

Acceptation : 02/10/2018

Publication : 08/01/2019

DAHOUA Lamri¹, SAVENKO Viatcheslav Yakovitch², OSYCHENKO Olena³, HADJI Riheb⁴¹⁻²⁻³Department of Road Construction and Maintenance, National Transport University, Kiev, Ukraine.⁴Department of Earth Sciences, IAST, Setif 1 University, Algeria.

Résumé- La variation des conditions aux limites est dans la plupart du temps le principal responsable de la perturbation de l'équilibre des talus et la mise en mouvement des terrains. Dans des conditions climatiques normales, les grains secs non consolidés se maintiennent stables pour un angle de frottement interne donné. Lors de précipitations intenses ou fonte de neige, l'infiltration de l'eau provoque une réduction des valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion des grains. Ceci influe négativement sur la stabilité du talus. Cette dernière est accentuée par l'effet des vibrations ce qui a pour conséquence la liquéfaction du sol. Appuyée par la déclinaison de la résistance au frottement inter granulaire, la chute des caractéristiques mécaniques du sol va mener à la translation du cercle de Mohr vers une courbe enveloppe de rupture. L'incorporation de nappes de géotextiles peut améliorer la stabilité des talus routiers. Elles exercent des tensions stabilisatrices opposant les forces qui déséquilibrent la stabilité des pentes. Ces forces ne sont pas prises en considération par la méthode de Bishop simplifiée comme rigoureuse sur laquelle repose un bon nombre de logiciels. Notre travail consiste à exécuter une approche mathématique pour introduire des valeurs variables de c' et ϕ' dans le critère de rupture afin de tenir compte des infiltrations d'eau et introduire en même temps un nouveau paramètre pour tenir compte de l'effet des sollicitations sismiques ainsi qu'une force pour tenir compte de la partie d'eau infiltrée. Enfin, des forces stabilisatrices engendrées par l'introduction de nappes de géosynthétiques sont engagées dans le polygone des forces. Le résultat montre que l'action de l'eau est la principale force perturbatrice du talus alors que l'action des géotextiles est la principale force stabilisatrice.

Mots - clés : Angle de frottement interne, Cohésion, Méthode des tranches, Séisme, Bishop.

Abstract- The variation of the boundary conditions is in most of the times the main cause of the disturbance of the slopes equilibrium, and the movement of the grounds. Under normal climatic conditions, unbound dry grains are stable at a given internal friction angle. During intense precipitation or snow break, the infiltration of water causes a reduction in the values of the angle of friction (ϕ'), and the cohesion (c') of the grains, which has a negative influence on the stability of the slope, the latter is accentuated under the effect of vibrations, where the liquefaction of the soil occurs. Supported by the declination of inter-granular friction resistance, the fall of the mechanical characteristics of the soil will lead to the translation of the Mohr circle towards a rupture envelope curve. The incorporation of geosynthetics can improve the stability of slopes and embankments. They exert stabilizing tensions opposing the forces which unbalance the stability of the slopes. These forces are not taken into consideration by the simplified or rigorous method of Bishop which is based on a lot of software. Our work consists in carrying out a mathematical approach to: introduce variable values of c' and ϕ' in the rupture criterion in order to take into account water infiltration, introduce a new parameter (F_s) to take into account the effect of seismic stresses, introduce a force (r) to account for the part of infiltrated water. Finally stabilizing forces generated by the introduction of geosynthetic layers (G_{eo}) are engaged in the polygon of forces. The result shows that the action of water is the main disturbing force of the slope, whereas the action of geotextiles is the main stabilizing force.

Key words: Internal friction angle, Cohesion, Slice method, Earthquake, Bishop.

1-Introduction

Les mouvements de terre sont parmi les phénomènes géodynamiques les plus répandus et souvent les plus graves à la surface de la Terre. Ils provoquent une modification naturelle et continue du relief et se produisent ou se réactivent généralement de façon inopinée, notamment lors des tremblements de terre et/ou lors des périodes pluvieuses intenses [1, 2, 3]. On distingue des instabilités structurales qui se produisent dans les massifs sous faibles contraintes montrant une structure géologique bien développée. Elles sont induites par les discontinuités géologiques, produites sous l'influence du poids propre des matériaux, par les secousses sismiques ou les activités anthropiques [4]. Les instabilités géotechniques sont induites par excès de contraintes dans les massifs [5, 6]. Les méthodes d'étude des instabilités sont empiriques par classification [7], analytiques par calculs de stabilité de pentes [8], numériques [9] et géo-mécaniques [10]. Pour les sols, les méthodes basées sur le calcul en équilibre limite sont les plus utilisées [11]. La comparaison entre les facteurs de sécurité des différentes méthodes de calcul de stabilité des pentes montre que la méthode de Bishop est la plus favorable pour subir une approche mathématique calculant le coefficient de sécurité pour un talus naturel soumis aux sollicitations perturbatrices et à un écoulement souterrain et stabilisée par l'étalement de nappes de géotextiles. Dans sa méthode simplifiée comme rigoureuse Bishop a travaillé en contraintes effectives suivant le postulat de Terzaghi ($\sigma' = \sigma - u$). Cette dernière égalité varie en fonction du niveau d'eau dans le sol [12]. Ce qui n'est pas évident car la pression interstitielle peut augmenter sous l'effet des surcharges causées par la succion lors de la désaturation du sol. Le principe de Terzaghi modifié par Bishop donne l'équation suivante : ($\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$) où χ est un coefficient dépendant des efforts de cisaillement ou de consolidation et σ , u_a et u_w sont respectivement le tenseur des contraintes totales, la pression d'air et la pression d'eau, ($s = u_a - u_w$ est la succion) [13]. Dans notre approche, les grains de sol et le liquide sont incompressibles et la pression d'air est considérée identique à la pression atmosphérique : $u_a = P_{atm}$.

Ces dernières années, l'utilisation des géosynthétiques dans les travaux publics a

connu un essor considérable grâce, surtout, à un coût de fabrication bas, des modes d'emploi faciles et des rendements de service élevés [14]. A la large gamme des géotextiles correspond une multiplicité de fonctions où le géotextile remplit plusieurs rôles à la fois [15], (Fig.1).

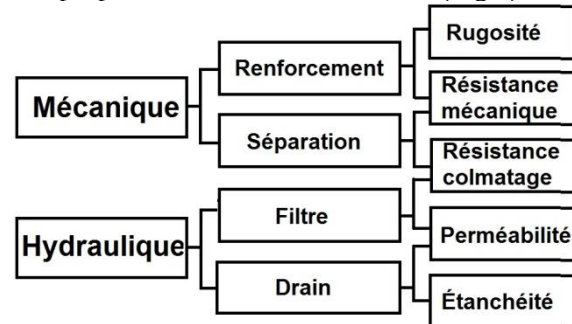


Figure 1 : Rôle, fonctions et propriétés des géotextiles (Role, functions and geotextile properties).

2-Méthodologie

La méthode de travail consiste à introduire des valeurs variables de c' et ϕ' dans le critère de rupture de Mohr-Coulomb afin de tenir compte des infiltrations d'eau, un paramètre (F^s) pour tenir compte de l'effet des sollicitations sismiques, une force (r) pour tenir compte de la partie d'eau infiltrée et des forces (G_{eo}) engendrées par l'incorporation de nappes de géotextiles dans le polygone des forces de Bishop. Pour réaliser notre approche mathématique, on a exploité le logiciel Geo-studio/Slope pour le montage du modèle géométrique et le langage (Matlab) pour la programmation et le calcul.

2.1- Influence de l'écoulement de l'eau

La variation cyclique de la pression interstitielle va engendrer une importante diminution des forces intergranulaires, ce qui peut conduire à une perturbation considérable de l'état des contraintes dans le talus. En se basant sur la théorie générale des nappes aquifères, l'équation de Richard et l'équation de Dupuit [16], on distingue deux forces : la première est produite par la pression interstitielle et la seconde est provoquée par l'écoulement des eaux d'infiltration. Cette dernière peut être décisive dans le déclenchement d'un glissement surtout si le sens d'écoulement coïncide avec la pente du talus. Cependant, il ne faut pas négliger la diminution de la résistance au cisaillement provoquée par l'action de l'eau le long de la surface de glissement.

$$\text{Le ratio : } ra = \frac{\Delta M_e}{\Delta M_p} = \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \frac{\sin \alpha \sin (\theta + \alpha)}{\cos \theta}$$

Avec : M_e moment moteur dû à la force d'écoulement et M_p moment dû au poids.

Selon Pilot [17], ce rapport présente l'action de l'eau d'écoulement comparée au poids propre de la tranche, ce dernier correspond au *ratio ra* qui n'est guère négligeable surtout lorsque les valeurs γ' et γ_w sont voisines.

Filliat [18] a proposée une loi de répartition des eaux d'écoulement dans le talus reliant la force de résistance au cisaillement à la contrainte effective normale et la contrainte tangentielle.

$$\sigma = \gamma' h \cos^2 \alpha (\lambda + \mu \tan \alpha)$$

avec λ la compressibilité.

Dans notre approche, on va introduire la force due à l'écoulement de l'eau (r) directement dans le polygone des forces de Bishop.

2.2- Influence des sollicitations sismiques

A la base du talus, la contrainte de cisaillement due au séisme est donnée par l'accélération de pointe du séisme a_h (normes suisses) et le facteur de réduction r_d de Seed [19].

$$\tau = 0.65 \cdot \frac{a_h}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d$$

Dans le corps du talus elle est plutôt exprimée par l'accélération maximale a_g agissant au centre de gravité de la tranche [20]

$$\tau = 0.65 \cdot \frac{a_g}{g} \cdot \sigma_v$$

L'accélération maximale (a_{max}) est donnée par la somme des valeurs d'accélération spectrales (a_i) de chaque spectre de réponse (ω_i). Ces derniers sont calculés (après ajustement) à partir des vitesses d'incidence (v_s) [21].

$$a_{max} = [(1.60 \times a_1)^2 + (1.06 \times a_2)^2 + (0.86 \times a_3)^2]^{0.5}$$

$$\omega_i = c \cdot \frac{v_s}{h} \cdot P = \frac{2\pi}{\omega}$$

pour le remplacement des sollicitations par des forces. La force horizontale appliquée sur une tranche est le produit de l'accélération moyenne par la masse de la tranche : $F_{horizontale} = a_{moy} \cdot m$

Tandis que la force verticale relie la composante verticale de l'accélération sismique à la masse de la tranche [22, 23].

$$F_{verticale}^s = a_{vert} \cdot m \leftrightarrow F_{verticale}^s = 0.66 a_{horizontale} \cdot m$$

2.3- Nappes de géosynthétiques

Le renforcement par des inclusions souples consiste à créer une structure avec des propriétés améliorées, composée d'un sol qui a souvent une résistance à la traction quasiment nulle mais qui résiste bien à la compression en association avec un géotextile qui a une meilleure résistance à la traction (table 1, et Fig. 2), [24]

Table 1 : Fonctions mécaniques d'un géotextile, (Mechanical functions of a geotextile).

Propriétés	Paramètres caractéristiques
Déformation	Courbe "force-allongement"
Fluage	Augmentation de la déformation sous force de traction constante
Frottement sol-géotextile	Angle de frottement sol-géotextile

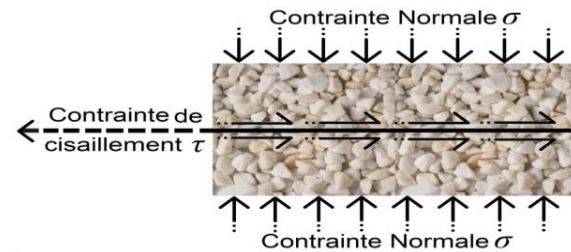
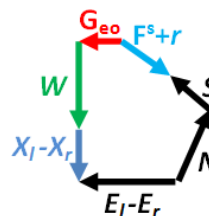


Figure 2 : Report des contraintes de traction dans le sol par les forces de cisaillement.

(Transfer of tensile stresses in the soil by shear forces).

L'utilisation de nappes de géosynthétiques peut sensiblement améliorer l'état d'équilibre du talus. Avec une disposition en couches, c'est seulement la composante tangentielle (G_{eo}) qui contribue à l'équilibre. Cependant, sa nature flexible écarte sa composante normale [25].

3-Approche mathématique



Avec : X_l , X_r , E_l , E_r force inter-tranche ;

W : poids ;

N : force normale ;

S : force de cisaillement ;

G_{eo} : force de traction des géotextiles ;

F^s : forces de séisme ;

r : force due à l'écoulement,

Figure 3 : Polygone des forces de Bishop. (Polygon of the forces of Bishop).

$$S = 1/F(c'(w) \ell + N \tan \varphi'(w)) \quad (1)$$

La projection des forces sur la vertical au centre de la tranche

$$(N + u_a \cdot \ell \cdot \chi \cdot \ell \cdot s_e) \cos \alpha = W + (x_L - x_R) \cdot S \cdot \sin \alpha + (F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta) \quad (2)$$

avec α : angle de la base de la tranche et θ : déclivité du niveau piézométrique

La substitution de S par sa valeur tirée de (1)

$$(N + u_a \cdot \ell \cdot \chi \cdot \ell \cdot s_e) \cos \alpha = W + (x_L - x_R) \cdot \sin \alpha / F(c'(w) \ell + N \tan \varphi'(w)) + (F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta)$$

$$(N \cos \alpha) + (u_a \cdot \ell \cdot \chi \cdot \ell \cdot s_e) \cos \alpha = W + (x_L - x_R) \cdot (c'(w) \ell / F) \sin \alpha - N \tan \varphi'(w) \sin \alpha / F + (F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta)$$

où $c'(w)$ et $\varphi'(w)$: sont des caractéristiques résiduelles dues à la fatigue du matériau.

$$N(\cos \alpha + (\tan \varphi'(w) \sin \alpha) / F) = W + (x_L - x_R) \cdot \ell (u_a - \chi \cdot s_e) \cos \alpha - c'(w) \sin \alpha / F + (F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta).$$

$$N = \frac{(W + (x_L - x_R) \cdot \ell (u_a - \chi \cdot s_e) \cos \alpha - c'(w) \sin \alpha / F) + (F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta)}{(\cos \alpha + (\tan \varphi'(w) \sin \alpha) / F)} \quad (3)$$

Pour plus de clarté et de simplification, Bishop a négligé les forces inter-tranches (présentant un écart minime entre elles) et a fixé le centre de gravité de la tranche à sa demi-hauteur. Les moments par rapport au centre de rotation de la masse glissante sont :

$$WR_x = S \cdot R \cdot F_{\text{vert}}^s R_x - F_{\text{horiz}}^s (R \cdot (\cos \alpha) - h/2) - r \sin \theta R_x - r \cos \theta (R(\cos \alpha) - h/2) + G_{eo}(R(\cos \alpha) - h/2).$$

$$WR \sin \alpha = R \cdot \ell \cdot F_{\text{vert}}^s R \sin \alpha - F_{\text{horiz}}^s (R \cdot (\cos \alpha) - h/2) - ((r \sin \theta R \sin \alpha) + ((r \cos \theta - G_{eo})(R(\cos \alpha) - h/2))) \quad (4)$$

L'introduction de critère de rupture ($\tau = c' + \sigma \tan \varphi'$) dans l'équation (4)

$$WR \sin \alpha = R/F[(c'(w) \ell + N \tan \varphi'(w) \ell) - (\ell \tan \varphi'(w) \cdot (u_a - \chi \cdot s_e))] - [(F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta)(R \sin \alpha)] - [(F_{\text{horiz}}^s + r \cos \theta - G_{eo}) \cdot (R(\cos \alpha) - h/2)] \quad (5)$$

$$F = \frac{R [(c'(w) \ell + N \tan \varphi'(w) \ell) - (\ell \tan \varphi'(w) \cdot (u_a - \chi \cdot s_e))]}{WR \sin \alpha + [(F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta)(R \sin \alpha)] + [(F_{\text{horiz}}^s + r \cos \theta - G_{eo}) (R(\cos \alpha) - h/2)]}$$

$$F = \frac{[c'(w) \ell + N \tan \varphi'(w)] - [\ell \tan \varphi'(w) \cdot (u_a - \chi \cdot s_e)]}{WR \sin \alpha + [(F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta)(R \sin \alpha)] + [(F_{\text{horiz}}^s + r \cos \theta - G_{eo}) (R(\cos \alpha) - h/2)]} \quad (6)$$

En substituant la valeur de N tiré de (3) en (6) et en sommant toutes les tranches :

$$F = \frac{\sum [c'(w) \ell + \frac{\tan \varphi'(w) [W - (\ell \cos \alpha (u_a - \chi \cdot s_e))] + (c'(w) \sin \alpha / F) + F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta}{\cos \alpha + (\tan \varphi'(w) \sin \alpha / F)} - \ell (u_a - \chi \cdot s_e)]}{\sum [W_i \sin \alpha_i + \left((F_{\text{horiz}}^s + r_i \cos \theta_i - G_{eo}) \left(\cos \alpha_i - \frac{h_i}{2R} \right) \right) + (r_i \sin \theta_i + \sum F_{\text{vert}}^s) (\sin \alpha_i)]} \quad (7)$$

$$\text{L'utilisation du terme : } \frac{1}{m_\alpha} = \frac{(\sec \alpha)}{(1 + (\tan \varphi'(w) \cdot \tan \alpha)) F}$$

$$F = \frac{(c'(w) \ell + N \tan \varphi'(w)) (W - (\ell \cos \alpha (u_a - \chi \cdot s_e))) + \left[\left(\left(c'(w) \frac{\sin \alpha}{F} + F_{\text{vert}}^s + r \sin \theta \right) (1/m_\alpha) \right) - \ell (u_a - \chi \cdot s_e) \right]}{\sum W_i \sin \alpha_i + [(F_{\text{horiz}}^s + r_i \cos \theta_i - G_{eo}) (\cos \alpha_i - (h_i/2R)) + (r_i \sin \theta_i + \sum F_{\text{vert}}^s) (\sin \alpha_i)]} \quad (8)$$

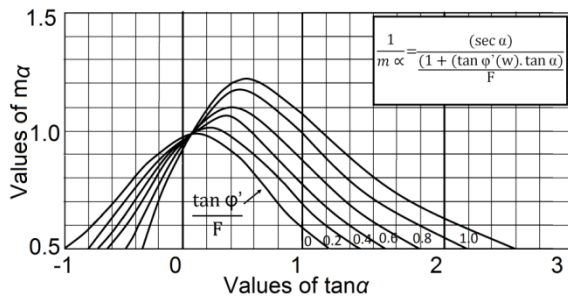


Figure 4 : Variation de m_α en fonction de $\tan \phi'$
(Variation of m_α as a function of $\tan \phi'$)

D'autres simplifications et substitutions sont possibles telles que le remplacement de la valeur du poids par sa formule exploitant la densité relative.

4-Résultats

L'équation (8) est le résultat de l'approche mathématique de la méthode de Bishop.

L'apparition des forces dues au séisme et à l'écoulement simultanément dans le numérateur et le dénominateur et la traction due aux géotextiles avec un signe négatif au dénominateur (joue un rôle positif en faveur de la stabilité) résument la différence entre le coefficient de sécurité de notre méthode modifiée et celui de la méthode de Bishop simplifiée et rigoureuse originales :

$$F = \frac{\sum \{c' b + \tan \phi' (w(1 - ru))\} 1/m_\alpha}{\sum \{c' b + \tan \phi' (w(1 - ru)) + (x_l - x_r)\} 1/m_\alpha}$$

$$F = \frac{\sum W s \sin \alpha}{\sum W s \sin \alpha + u}$$

avec $\phi' = \phi \cdot K_\phi$ et $ru = \frac{u}{\text{contrainte totale verticale}}$

Ceci permet de tracer un intervalle de sécurité lors de la conception des remblais et de prendre en considération les différents agents intervenant dans la mise en mouvement d'un talus naturel.

5-Modèle d'application

L'utilisation d'un géotextile de renfort s'est avérée indispensable pour stabiliser le talus (PK 240+847) situé sur l'autoroute A1, commune de Hanif, wilaya de Bouira (Algérie). Le renforcement est supposé être assuré avec un géotextile non-tissé en fibres de polyester avec un coefficient de sécurité vis-à-vis de la traction ($F_t \geq 6$). Les caractéristiques de l'ouvrage retenu par l'étude sont : une longueur de nappe de 4,5m à partir de l'extérieur, un espacement des lits dans le massif renforcé de 0,70m intercalées avec trois couches de remblai de 0,25m d'épaisseur chacun sur une hauteur totale

de 13m. Le profil type du massif renforcé retenu était composé de 19 lits de renforcement avec un retour situé en partie inférieure d'un mètre de longueur. Les nappes en géotextile sont posées horizontalement à l'intérieur du remblai compacté pendant sa construction. Une mise en œuvre soignée des nappes sur une longueur de 50 m le long du tronçon assurant une bonne interaction avec le sol est exigée. Les performances d'un renforcement du sol par des géosynthétiques par rapport à une conception similaire non renforcée sont comparées. Le profil en travers du (PK 240+847) a été pris comme modèle d'application pour notre étude.

6-Programme de calcul

Une fois le coefficient de sécurité initial F_1 calculé par la méthode de Bishop originale avec les conditions présentes du talus ($F_1=0,934$), on peut simuler une prévision numérique de la stabilité lors de l'apparition d'un ensemble de facteurs opposant la stabilité. L'utilisation d'un programme numérique pour le calcul de la stabilité est désormais indispensable, (Fig.5).

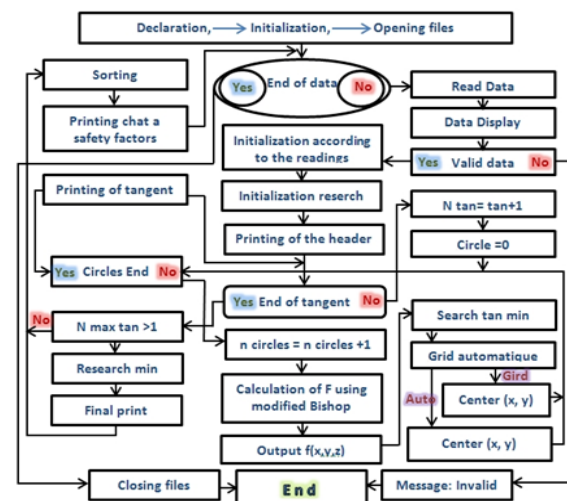


Figure 5 : Organigramme de calcul.
(calculation flowchart).

Le calcul du coefficient de sécurité avec la méthode de Bishop modifiée (programmée sous Matlab) nous amène, en premier lieu, à impliquer toutes les forces actives qui tendent à provoquer un cisaillement le long d'une surface. Cela donne un coefficient de sécurité ($F = 0.567$). Cette valeur est nettement inférieure à celle fournie par la version originale, ce qui est évidemment dû à l'action des forces perturbatrices. Ensuite, l'implication progressive des forces dues à l'action des



géotextiles (G_{eo}), fait migrer le coefficient F_s vers des valeurs de sécurité et peut assurer la stabilité du talus à court ($F_s \geq 1,2$) et à long terme ($F_s \geq 1,5$).

7- Conclusion

L'approche mathématique proposée par notre étude traite la considération de nouveaux paramètres à ceux d'une méthode classique de calcul de stabilité. Cela permet de mieux comprendre les mécanismes de la mise en mouvement d'un talus naturel ou dressé et de tracer un intervalle de sécurité dans les talus exposés à l'action de l'eau ainsi que les sollicitations vibratoires. Au moyen de la méthode de Bishop modifiée, nous avons pu suivre l'évolution du coefficient de sécurité en fonction des valeurs variables de la traction des nappes de géosynthétiques et sollicitations sismiques. L'instabilité apparaît ainsi directement liée à la position de ces deux agents. L'apparition du terme G_{eo} avec un signe négatif dans le dénominateur de l'équation démontre le confortement exercé par la traction des géotextiles vis-à-vis de la stabilité.

Ce type de soutènement permet aux sols de soutenir des charges plus importantes et de résister à des angles plus prononcés. Un gain en durée de vie de l'ouvrage, une amélioration des caractéristiques géotechniques du sol tout en augmentant les caractéristiques mécaniques et la possibilité de construction dans des milieux défavorables, sont aussi enregistrés.

La programmation numérique s'avère indispensable pour pouvoir calculer le coefficient de sécurité avec les conditions réelles du terrain et/ou d'effectuer une prévision de la stabilité en faisant varier les forces relatives à l'ensemble des facteurs de prédisposition et de déclenchement des mouvements de pentes.

Remerciement

Les auteurs tiennent à remercier les évaluateurs pour leur critique objective du manuscrit. Nous remercions également l'Université Nationale des Transports de Kiev (Ukraine) pour la fourniture des supports bibliographiques.

Références bibliographiques

- [1] Hadji, R., Rais, K., Gadri, L., Chouabi, A., & Hamed, Y. *Slope failure characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machroha municipalities, Northeast Algeria*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, vol. 42, no 1, p. 281-300.
- [2] Dahoua, L., Yakovitch, S. V., & Hadji, R. *GIS-based technic for roadside-slope stability assessment: an bivariate approach for A1 East-West highway, North Algeria*. Mining Science, 2017, vol. 24.
- [3] Mahdadi, F., Boumezbeur, A., Hadji, R., et al., *GIS-based landslide susceptibility assessment using statistical models: a case study from Souk Ahras province, NE Algeria*. Arabian Journal of Geosciences, 2018, vol. 11, no 17, p. 476.
- [4] Landry, A., *Utilisation d'une approche photogrammétrie-DFN pour l'évaluation des conditions structurales du projet minier souterrain Éléonore*. 2015.
- [5] Poulsen, B. A., Adhikary, D. P., Elmouttie, M. K., & Wilkins, A. *Convergence of synthetic rock mass modelling and the Hoek-Brown strength criterion*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, vol. 80, p. 171-180.
- [6] Hoek, E., & Bray, J. D., *Rock slope engineering*. CRC Press, 2014.
- [7] Aydan, Ö., Ulusay, R., & Tokashiki, N. *A new rock mass quality rating system: rock mass quality rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses*. Rock mechanics and rock engineering, 2014, vol. 47, no 4, p. 1255-1276.
- [8] Souza, M. F., & Nelson, M. G. *A Comparison of the Shear Strength Reduction Technique and Limit Equilibrium Method for Slope Stability*. In: 52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2018.
- [9] Tschuchnigg, F., Schweiger, H. F., & Sloan, S. W. *Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques*. Computers and geotechnics, 2015, vol. 70, p. 169-177.
- [10] Zahri, F., Boukelloul, M.L., Hadji, R., et al., *Slope stability analysis in open pit mines*



- of *Jebel Gustar career, NE Algeria—a multi-steps approach*. Mining Science, 2016, vol. 23.
- [11] Achour, Y., Boumezbear, A., Hadji, R. et al., *Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria*. Arabian Journal of Geosciences, 2017, vol. 10, no 8, p. 194.
- [12] Sibille, L., *Bases de la Géotechnique Module MXG4 IUT Génie Civil et Construction Durable*. 2018.
- [13] Arai, W., Prunier, F., Djéran-Maigre, I., et al., A new insight into modelling the behaviour of unsaturated soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, vol. 37, no 16, p. 2629-2654.
- [14] Broda, J., Przybyło, S., Gawłowski, A., et al., *Utilisation of textile wastes for the production of geotextiles designed for erosion protection*. The Journal of The Textile Institute, 2018, p. 1-9.
- [15] Bessaim, M., Bessaim, A., Missoum, H., et al. *Soil reinforcement with geosynthetics*. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2018. p. 02096.
- [16] Rezzoug, A. Alexis, A. et Kismi, M. *Influence de la Marée sur la Stabilité des Pentes*. Actes des 3èmes Journées Nationales Génie Civil, Génie Côtier, Sète, 1994, p. 2-4.
- [17] Khabiri, M. Khishdari, A. et Gheibi, E. *Effect of tyre powder penetration on stress and stability of the road embankments*. Road Materials and Pavement Design, 2017, vol. 18, no 4, p. 966-979.
- [18] Dhaybi, M., *Renforcement de fondations superficielles par soil mixing : analyse par modélisation physique et numérique*. 2015. Thèse de doctorat. INSA de Lyon.
- [19] Seed, H.B. et De Alba, P. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands. In: *Use of in situ tests in geotechnical engineering*. ASCE, 1986. p. 281-302.
- [20] Houda, M., Jenck, O., & Emeriault, F. *Massifs de sol renforcé par inclusions rigides : analyse de l'effet d'un chargement cyclique vertical quasi statique par expérimentation sur modèle réduit et validation numérique*. Revue Française de Géotechnique, 2016, no 147, p. 2.
- [21] Ghahreman-Nejad, B., & Kan, M., *Seismic Deformation Analysis of Embankment Dams: A Comparison between Simplified and Non-Linear Numerical Methods*. NRC Research Press, 2017. 745.
- [22] Khansal, A., *Modélisation numérique de l'essai de cisaillement annulaire*. Thèse de doctorat. Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2.
- [23] Mestat, Ph., *Du bon usage de l'élasticité dans les calculs de géotechnique. La pratique des calculs tridimensionnels en géotechnique*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Ed. Magnan J.P., Guilloux A, Mestat P, 241, 1998, vol. 256.
- [24] SERE, Amidou. *Ouvrages renforcés par géotextiles chargés en tête : comportement et dimensionnement*, 1995. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- [25] Houam, A., *Amélioration de la stabilité des talus par l'utilisation de nappes horizontales de "géosynthétiques"*, 1991.