



Calibrage du modèle numérique, cas du comportement dynamique d'un système sol-soutènement **(Numerical model calibration, case of dynamic behavior of a soil-retaining wall system)**

S.M.A. Bourdim¹, N. Boumechra², A. Djedid²

¹ *Laboratoire de Matériaux et Procédés de Construction (LMPC), Département de Génie Civil et d'Architecture, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Algérie*

² *Laboratoire de recherche EOLE, Département de Génie Civil, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie*

* *Corresponding author. E-mail: bourdim80@yahoo.fr*

Abstract

Excessive use of numerical simulations can sometimes provide inconsistent results not conform with physical reality if certain precautions are not observed. In this article, we treat the essential step that is the calibration phase of numerical models. To do this, we took as an example a geotechnical system consisting of a soil-retaining wall subjected to dynamic loading. The simulations were performed using the software Plaxis2D. The results obtained show that they are highly dependent on the nature of boundary conditions, the number of dynamic secondary steps, the refinement of the finite element mesh, the time step of calculation, and the damping parameters as well as those of Newmark.

Keywords: Calibration, Modeling, Soil-retaining wall system, Dynamic analysis, Newmark.

Résumé

L'utilisation abusive des simulations numériques dans le domaine du génie civil, peut parfois fournir des résultats non conformes à la réalité physique si certain nombre de précautions ne sont pas observées. Dans cet article, on traite de l'étape indispensable qu'est la phase de calibrage des modèles numériques. Pour cela, nous avons pris comme exemple un système géotechnique constitué d'un sol-mur de soutènement soumis à un chargement dynamique. Les simulations effectuées à l'aide du logiciel Plaxis2D dont les résultats obtenus montrent que les résultats finaux dépendent énormément de la nature des conditions aux limites, du nombre des étapes secondaires dynamiques, du raffinement du maillage éléments finis, le pas du temps de calcul, les coefficients d'amortissement et les paramètres de Newmark.

Mots-Clefs : Calibrage, Modélisation, Système sol-mur de soutènement, Analyse dynamique, Newmark.

1. Introduction

L'analyse dynamique pourrait être considérée comme l'instrument le plus complet pour la prédiction de la réponse sismique d'un système géotechnique, parce qu'elle fournit une bonne indication sur la distribution des contraintes et des déformations. L'analyse a cependant besoin d'un modèle de sol adéquat avec des caractéristiques appropriées du sol et une bonne définition des données sismiques. En effet, lors des simulations, l'ingénieur doit être capable de repérer les influences du modèle numérique par rapport aux phénomènes

physiques. Cette étape, dite calibrage, est une étape indispensable si l'on veut que les résultats reflètent plus ou moins la réalité.

Dans cette étude, nous avons choisi d'examiner l'influence d'un certain nombre de paramètres (conditions aux limites, les étapes secondaires dynamiques, le maillage, le pas du temps de calcul, l'amortissement et les paramètres de Newmark) sur la réponse dynamique du système géotechnique sol-mur de soutènement. Les simulations ont été effectuées à l'aide du code de calcul en éléments finis Plaxis2D [1]. L'étude consiste l'examen de l'effet de type des frontières du modèle, des coefficients d'amortissement, les étapes secondaires dynamiques, le raffinement du maillage, le pas du temps de calcul et les paramètres de Newmark, sur la réponse finale du système. La configuration du mur de soutènement pris dans cet exemple est donnée sur la figure 1.

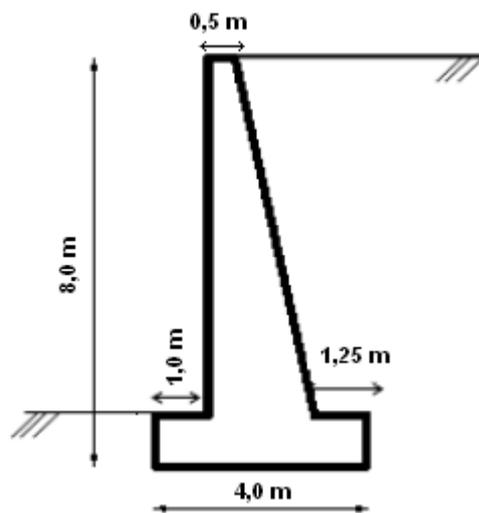


Figure 1: Configuration du mur de soutènement.

2. Excitation Séismique

Le chargement dynamique est représenté par des ondes de cisaillement provenant de l'enregistrement du séisme de Boumerdes 2003 survenu le 21 mai 2003, caractérisé par une magnitude de 6,8 et une accélération maximale PGA de 0,34 g [2]. Le signal utilisé est suivant la composante Est-Ouest enregistrée à la station de Keddarra, figure 2.

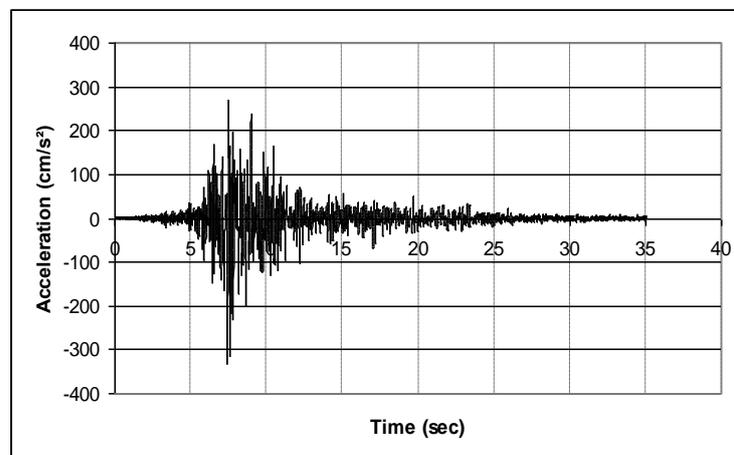


Figure 2: Le chargement sismique appliqué

3. Choix des frontières latérales

L'utilisation d'un modèle en éléments finis pour l'analyse de la réponse dynamique d'un système géotechnique nécessite un traitement spécifique pour la frontière du massif du sol. Il est par conséquent nécessaire de prendre des précautions particulières pour assurer la transmission des ondes incidentes sur ces frontières, et d'éviter leurs réflexions qui peuvent générer des efforts parasites et artificiels.

Compte tenu de la complexité de ces phénomènes, certains auteurs [3] et [4] ont proposés de placer la frontière du massif du sol loin de la structure, de telle manière à ce que les ondes réfléchies soient en grande partie amorties avant leur retour à la structure [3]. Ils s'appuient sur le fait que les ondes sismiques s'atténuent dans le milieu dans lequel elles se propagent.

Cette atténuation peut s'écrire sous la forme :

$$A(r) = A_0 \cdot r^{-n} \cdot e^{-z \cdot d} \quad (1)$$

Avec :

$$z = \frac{2\pi \cdot f \cdot B}{V} \quad (2)$$

V : Vitesse de propagation de l'onde et sa ;

f : fréquence de la propagation d'onde ;

B : Amortissement du matériau ;

d : Distance parcourue par l'onde;

r^{-n} : Fonction d'atténuation;

n : Coefficient dépend du type d'onde et de la géométrie ($n=0,5$ pour les ondes de surface et $n=1$ pour les ondes de volume).

Pour un sol ayant un amortissement modéré soumis à des vibrations harmoniques, l'extension du massif de sol doit être très importante, de l'ordre de 5 à 10 fois la profondeur du massif de sol. Pour un amortissement élevé, l'extension latérale du massif peut être réduite à 2,5 fois de cette profondeur. Pour un système sol-structure ayant une fréquence fondamentale élevée, une extension du domaine de 2,5 à 5 fois la profondeur est conseillée [2].

Pour étudier l'effet de la nature des conditions aux limites, deux cas ont été traités. Le premier cas concerne des frontières libres alors que le second concerne le cas de frontières visqueuses absorbantes, le logiciel Plaxis2D permet effectivement de prendre ces deux configurations.

La figure 3 représente la variation de la contrainte de cisaillement lors du chargement dynamique. On note que pour des frontières absorbantes (Standard Earthquake Boundaries: SEB), la réponse s'amortit plus vite et la contrainte de cisaillement τ se stabilise autour d'une certaine valeur. Quand les frontières sont libres (Free Horizontal Displacements : FHD), la contrainte de cisaillement est beaucoup plus élevée et ne stabilise pas, et des vibrations se produisent après la fin du chargement sismique.

4. Condition sur le choix du maillage

La résolution par éléments finis d'un problème de propagation d'ondes sismiques dans un sol nécessite l'utilisation d'un maillage fin afin d'assurer correctement la transmission des ondes par les éléments de maillage. La génération du maillage dans Plaxis est entièrement automatique et basée sur une procédure robuste de triangulation, ayant comme conséquence un maillage " non structurée", mais optimisé par rapport à la géométrie du modèle utilisé.

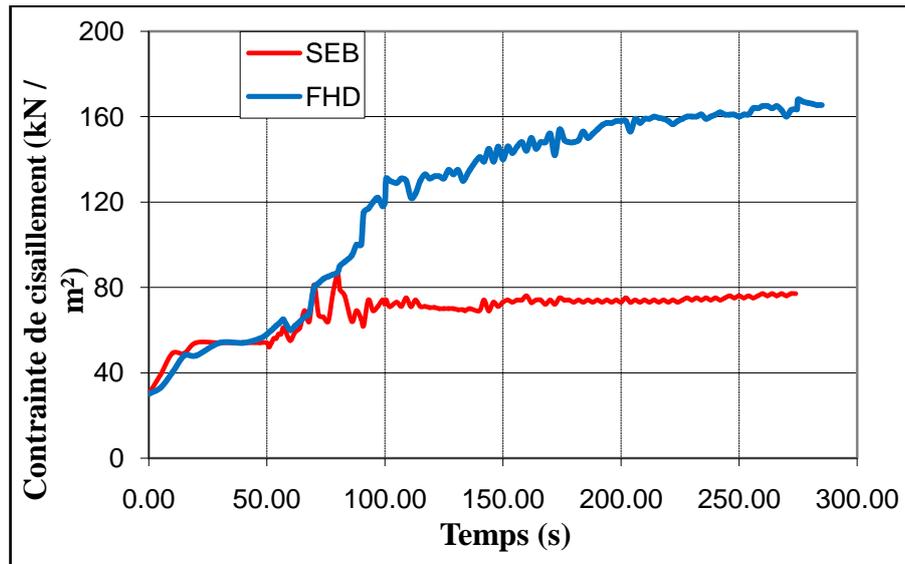


Figure 3: Comparaison entre l'effet des frontières latérales libres (FHD) et absorbantes (SEB) sur la contrainte de cisaillement au bas du mur.

Une étude réalisée par Kuhlemeyer et Lysmer [4] a montré que le maillage utilisé dans les problèmes de propagation d'ondes doit vérifier la condition suivante :

$$AES \leq \frac{\lambda}{8} = \frac{V_s}{8 \cdot f_{\max}} \quad (3)$$

f_{\max} : Fréquence la plus élevée à transmettre ;

V_s : Vitesse de propagation des ondes de cisaillement ;

λ : Longueur d'onde correspondante à la fréquence maximum.

Le paramètre AES représente dans le code de calcul Plaxis 2D la taille moyenne des côtés des éléments triangulaires utilisés (Average Element Size).

5. Amortissement du système

L'amortissement matériel est dû aux propriétés visqueuses, au frottement et au développement de la plasticité. Dans les simulations numériques, on cite l'amortissement numérique qui est dû à la formulation en éléments finis [4].

Dans la majorité des codes de calcul dynamique en élément finis, l'amortissement matériel est simulé à l'aide de la formulation connue de Rayleigh :

$$C = \alpha.M + \beta.K \quad (4)$$

Les coefficients d'amortissement de Rayleigh α et β peuvent être déterminés à partir d'au moins deux données du taux d'amortissement ξ_i qui correspondent à deux fréquences de vibration ω_i [5]. La relation entre α, β, ξ_i et ω_i est donnée par :

$$\alpha + \beta.\omega_i^2 = 2.\omega_i.\xi_i \quad (5)$$

La figure 4 illustre la variation de l'accélération au sommet du mur pour trois valeurs du coefficient d'amortissement de Rayleigh α (0%, 5% et 10%). Le coefficient β est maintenu égal à zéro pour éviter l'amortissement excessif du mouvement aux hautes fréquences.

L'équation (4) indique clairement que l'augmentation du coefficient de Rayleigh entraîne une augmentation de la matrice d'amortissement [C]. Cette évidence est retrouvée sur la figure 4 où l'amortissement augmente lorsque α augmente.

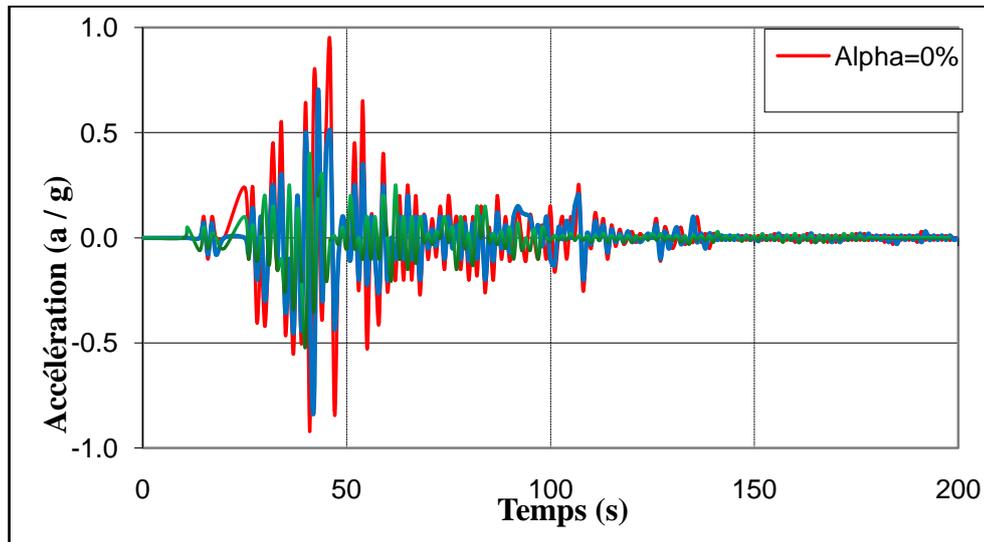


Figure 4: Effet du coefficient d'amortissement matériel de Rayleigh α sur l'accélération au sommet du mur.

Dans l'exécution numérique des problèmes dynamiques, la formulation de l'intégration du temps constitue un facteur important pour la stabilité et la convergence du processus numérique [6]. Dans Plaxis 2D, la forme implicite d'intégration du temps de type Newmark est mise en application. Ainsi, le déplacement et la vitesse sont donnés respectivement par les équations 6 et 7 :

$$U^{t+\Delta t} = U^t + \dot{U}^t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - N_\alpha \right) \ddot{U}^t + N_\alpha \ddot{U}^{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad (6)$$

$$\dot{U}^{t+\Delta t} = \dot{U}^t + \left[(1 - N_\beta) \ddot{U}^t + N_\beta \ddot{U}^{t+\Delta t} \right] \Delta t \quad (7)$$

Les coefficients de Newmark N_α et N_β déterminent la convergence et la stabilité de l'intégration numérique. Pour introduire la dissipation numérique qui conduit à la stabilité de la réponse temporelle, il y a des propositions pour la modification de la formule initiale de Newmark en introduisant le paramètre γ . La formule de Newmark initiale mène à une forme d'intégration inconditionnellement stable sur le temps. Les nouveaux coefficients de Newmark sont exprimés en fonction du paramètre γ :

$$N_\alpha = \frac{(1 + \gamma)^2}{4} \quad (8)$$

$$N_\beta = \frac{1}{2} + \gamma \quad (9)$$

Avec : $0 \leq \gamma \leq \frac{1}{3}$

Afin d'obtenir une solution stable, on doit veiller au respect de la condition suivante :

$$N_{\alpha} \geq \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2} + N_{\beta} \right)^2 \quad (10)$$

La figure 5 illustre la variation de l'accélération au sommet gauche du mur pour quatre valeurs du paramètre γ (0 ; 0,1 ; 0,2 et 0,33). Elle montre que pour des valeurs élevées du paramètre γ , la réponse se stabilise à la fin du chargement. Pour le cas où $\gamma = 0$, l'accélération garde sa magnitude élevée et aucune convergence n'est observée à la fin du processus de calcul. On peut dire que le paramètre γ gouverne la dissipation numérique et joue un rôle important dans la stabilité de la réponse temporelle.

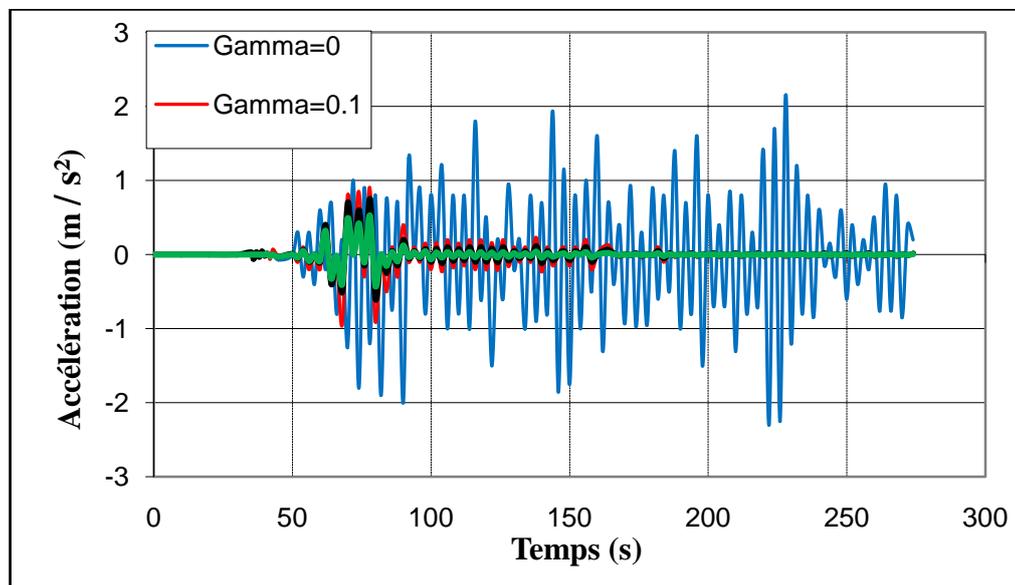


Figure 5: Effet des coefficients de Newmark, pour quatre valeurs de γ .

6. Nombre des étapes dynamiques secondaires

Un autre paramètre numérique qui peut influencer fortement les résultats de l'analyse dynamique dans le code de calcul Plaxis, est le nombre des étapes secondaires dynamiques (Dynamic Sub Steps: DSS). Ce nombre (DSS) est le nombre d'itération du calcul sur le pas de temps $t_{i+1} = t_i + \Delta t$. Il doit être bien déterminé avant d'entamer l'analyse dynamique afin d'obtenir des résultats fiables dans un temps de calcul réduit [7].

Le pas de temps utilisé dans un calcul dynamique est constant et est égal à [8]:

$$\delta t = \frac{t}{n \cdot DSS} \quad (11)$$

t : Durée du chargement dynamique (Time Interval) ;

n : Nombre des étapes additionnel ;

DSS : Nombre des étapes secondaires dynamiques.

Pour chaque étape additionnelle de temps, le code de calcul Plaxis détermine le nombre des étapes secondaires nécessaires pour atteindre le temps de la fin du processus de calcul estimé avec une exactitude suffisante sur la base du maillage produit et du pas $\delta t_{critique}$ calculé tel que :

$$\delta t_{critique} < \frac{AES}{V_s} \quad (12)$$

La valeur du paramètre DSS est fournie automatiquement par le logiciel. Quand elle n'est pas adéquate, l'utilisateur a la possibilité de la modifier.

Une comparaison a été effectuée pour quatre valeurs de DSS afin d'estimer la valeur de ce paramètre qui doit être utilisé dans l'analyse dynamique.

La figure 6 représente le déplacement au sommet du mur pour cinq valeurs du paramètre DDS (1, 50, 100, 200 et 300). On constate que les résultats sont affectés par la variation de ce paramètre et qu'une valeur au-delà de 50 donne des courbes presque confondues. Ceci indique qu'à partir d'une valeur de DSS égal à 50, la réponse temporelle devienne plus stable.

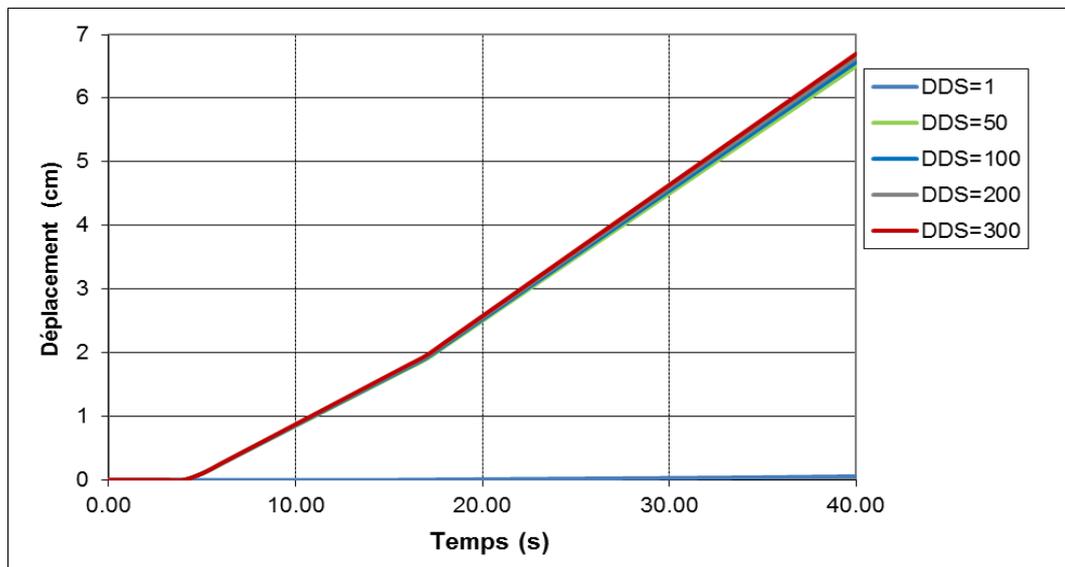


Figure 6: Evolution du déplacement dans une analyse dynamique pour différentes valeurs de DSS .

Conclusion

L'analyse du comportement dynamique des ouvrages géotechniques requiert une importance particulière dans la pratique. Les modèles numériques facilitent la compréhension de ces phénomènes en permettant des simulations diverses [9,10]. Néanmoins, l'utilisation de ces outils sans discernement peut conduire à des interprétations erronées. Une des étapes importantes dans les simulations est l'étape de calibrage du modèle numérique. Nous avons montré à travers l'exemple choisi que les résultats peuvent être complètement différents et surtout illogiques si les choix opérés ne sont pas adéquats. Dans le cas des processus dynamiques, un calibrage adéquat nécessite un choix approprié des coefficients de Newmark, de façon à éviter la non dissipation numérique et/ou la perte de contenu fréquentiel du signal sismique.

Remerciements-Nous sommes très reconnaissants aux membres du comité scientifique et du comité d'organisation de la 7^{ème} Édition des Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement (JIGE7) pour le chaleureux accueil durant notre séjour à Béni-Mellal au Maroc.

Références

1. Brinkgereve R., Vermeer P., PLAXIS Version 8, Scientific manual, *DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas* (2003).
2. Bourdim S.M.A., Contribution à l'étude d'interaction sol-structure, Exemple mur de soutènement, *Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Algérie* (2010).
3. Yun-Suk C., Etude numérique de l'interaction sol-pieu-structure sous chargement sismique, *Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France* (2000).
4. Yang K., Zornberg J., Hung W., Lawson C., Location of failure plane and design considerations for narrow geosynthetic reinforced soil wall systems, *Journal of GeoEngineering*, 6(1) (2011) 27-40.
5. Kuhlemeyer R. and Lysmer J., Soil Mech. Foundatn, *Division*, 99 (1973) 421-427.
6. Frank R., Eurocode7 on Geotechnical design: a code for soil-structure interaction, *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, 1 (2014) 1-10.
7. Kianoosh H., Calibration de la simulation numérique de la réponse de murs de soutènement renforcé sous chargement statique, *Thèse de Doctorat, Collège militaire royal du Canada* (2012).
8. Brinkgereve R., Vermeer P., PLAXIS Version 8, Dynamics manual, *DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas* (2003).
9. Rahmouni O., Mabrouki A., Benmeddour D., Mellas M., Numerical study of geogrid-reinforced segmental earth retaining wall, *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, 2 (2015) 43-49.
10. Hirich A., Choukr-Allah R., Ragab R., Jacobsen S-E., El youssfi L., El omari H., *J. Mater. Environ. Sci.* 3 (2012) 342-359

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>