

---

# Analyse numérique de la réponse sismique d'un quai sur pieux

DEGHOUL Lylia<sup>1</sup>, GABI Smail<sup>2</sup> et TERBOUCHE Farid<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (LGEA), Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou (UMMTO), Algérie. deghoul.lylia@gmail.com

<sup>2</sup> Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (LGEA), Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou (UMMTO), Algérie. gabismail@yahoo.com

<sup>3</sup> Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (LGEA), Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou (UMMTO), Algérie. faridterbo@gmail.com

---

*RÉSUMÉ.* Le but de ce travail est d'étudier le comportement d'un quai sur pieux dans un talus en enrochement (digue en enrochement), soumis à un séisme d'une accélération maximale du sol (PGA) de 0,5 g. Le quai se compose d'une plateforme fondée sur plusieurs pieux verticaux, encastrés dans du sable dense. La géométrie type du modèle qu'on a utilisé a été inspirée du modèle réduit en centrifuge [MCC 03] et [BOL 01]. Deux modèles de comportement de sol disponibles dans le code de calcul en éléments finis PLAXIS 2D sont utilisés : le modèle linéaire élastique parfaitement plastique (Modèle de Mohr-Coulomb : MC) et le modèle élastoplastique avec écrouissage isotrope (Modèle Hardening Soil : HS). Les résultats obtenus montrent de grandes déformations latérales en cisaillement qui apparaissent dans la digue en enrochement sans pour autant compromettre sa stabilité. Le déplacement et le moment fléchissant obtenus dans les pieux en utilisant les deux modèles MC et HS ont été comparés. Les résultats obtenus à partir du modèle MC enregistrent un grand intervalle comparé à ceux obtenus à partir du modèle HS.

*ABSTRACT.* The aim of this study is to investigate the behavior of a pile supported harbor wharf on a rock slope (rock dike), subjected to earthquake accelerations with peak ground accelerations (PGA) of 0,5 g . The wharf consists of a platform based on several vertical piles, embedded in dense sand. This academic geometry of model was inspired by centrifuge models [MCC 03] and [BOL 01]. Two constitutive models using the finite elements code PLAXIS 2D were used. These models are a linear elastic perfectly plastic model (Mohr-Coulomb Model: MC) and an elastoplastic model with isotropic hardening (Hardening Soil Model: HS). The results showed that large lateral shear deformations appear in the dike without compromising its stability. The displacement and bending moment obtained in the piles using the MC and HS models were compared. The results obtained from the MC model recorded a large gap compared with those obtained from the HS model.

*MOTS-CLÉS:* quai, pieux, séisme, talus en enrochement, modèle de comportement, méthode des éléments finis.

*KEYWORDS:* wharf, piles, earthquake, rock slope, constitutive models, finite element method.

---

## 1. Introduction

Les séismes passés ont occasionné des dégâts structurels et matériels importants sur les structures maritimes : le séisme de Loma Prieta 1989, le séisme de Northridge 1994 [PIAN 01], etc. Dans ce travail, on se focalise sur l'analyse du comportement sismique des quais sur pieux dans un talus en enrochement. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce cas [MUR 97], [MCC 03]. Nous avons vu intéressant d'étudier l'influence de deux modèles de comportement du sol sur les résultats de notre simulation numérique par la méthode des éléments finis. Les lois de comportement utilisées sont brièvement présentées ci-dessous [PLA 14].

## 2. Modèles de comportement

### 2.1. Le modèle Mohr-Coulomb (MC)

Le modèle élastique parfaitement plastique avec le critère de rupture de type Mohr-Coulomb est un modèle bien connu et fréquemment utilisé. Il nécessite cinq paramètres fondamentaux : le module de Young  $E$ , le coefficient de Poisson  $\nu$ , la cohésion  $C$ , l'angle de frottement  $\varphi$  et l'angle de dilatance  $\psi$ .

### 2.2. Modèle de sol avec écouvissage (Modèle Hardening Soil: HS)

Le modèle de sol avec écouvissage est un modèle avancé développé par Schanz [SCH 99] pour simuler différents comportements de sol. Lorsqu'il est soumis à un premier chargement déviatorique, le sol présente une rigidité décroissante et développe simultanément des déformations plastiques irréversibles. Dans le cas particulier d'un essai triaxial drainé, la relation observée entre la déformation axiale et la contrainte déviatorique peut être bien approchée par une hyperbole [KON 63]. Ce modèle est dérivé du modèle hyperbolique de Duncan-Chang [DUN 70]. En plus des paramètres du modèle MC, le modèle HS nécessite les paramètres suivants : le module de rigidité sécant  $E_{50}^{ref}$ , le module de rigidité tangent du chargement œdométrique  $E_{oed}^{ref}$ , le module de rigidité en déchargement-rechargement  $E_{ur}^{ref}$  à une pression de référence  $P^{ref} = 100\text{kN/m}^2$ , un paramètre  $m$  qui contrôle la dépendance contrainte/rigidité selon une fonction de puissance, un rapport  $R_f$  qui est généralement compris entre 0,8-0,9, et le coefficient des terres au repos  $K_0^{nc}$  [PLA 14].

## 3. Géométrie du modèle

Le quai est constitué d'une plateforme d'une longueur de 28,1m, supportée par trois rangées de 7 pieux verticaux dans le sens transversal, d'une longueur d'environ 22,38m et d'un espacement de 4m. La hauteur de la digue est de 15,2m avec une pente de  $\frac{1}{2}$ , surmontant une couche de sable dense de 10,8m d'épaisseur. La profondeur d'eau est de 12,4m. Pour définir cette géométrie, on s'est inspiré du modèle en centrifugeuse du prototype SMS02 de [MCC 03] et [BOL 01]. La géométrie du modèle est présentée sur la figure 1.

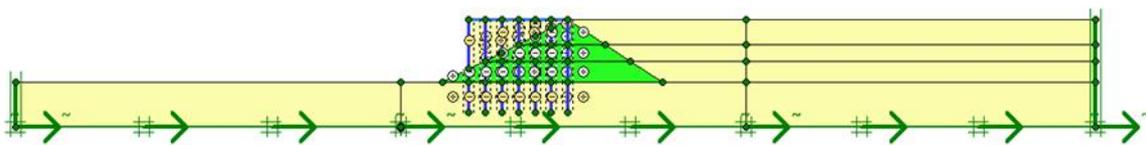


Figure 1. Géométrie du modèle

## 4. Paramètres géotechniques du sol

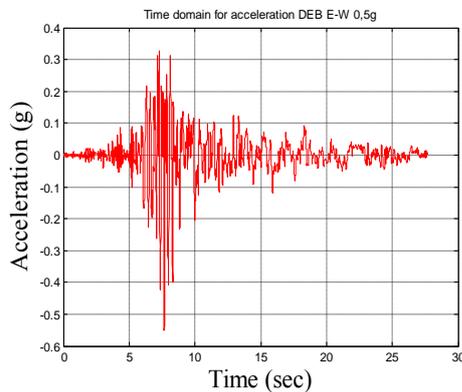
On trouve fréquemment des talus en enrochement sous la plateforme des quais sur pieux, la plupart du temps ils sont fondés sur du sable. Notre modélisation comporte deux types de sol : des enrochements [CIH 11] et du sable dense [BES 12], leurs caractéristiques figurent dans le tableau 1.

Type de sol	Modèle	$\gamma_{unsat}$ kN/m <sup>3</sup>	C kN/m <sup>2</sup>	$\varphi$ °	$\nu$ -	$\psi$ °	E kN/m <sup>2</sup>	$E_{50}^{ref}$ kN/m <sup>2</sup>	$E_{oed}^{ref}$ kN/m <sup>2</sup>	$E_{ur}^{ref}$ kN/m <sup>2</sup>	m	$K_0^{nc}$	$R_f$
Sable dense	MC	18	1	35	0.3	5	$5 \times 10^4$	-	-	-	-	-	-
	HS	18	1	35	0.3	5	-	$5 \times 10^4$	$5.8 \times 10^4$	$2.16 \times 10^5$	0.5	0.426	0.9
Enroche- ment	MC	16	1	47	0.2	6	$6.6 \times 10^4$	-	-	-	-	-	-
	HS	16	1	47	0.2	6	-	$6.6 \times 10^4$	$5.53 \times 10^4$	$1.98 \times 10^5$	0.5	0.269	0.9

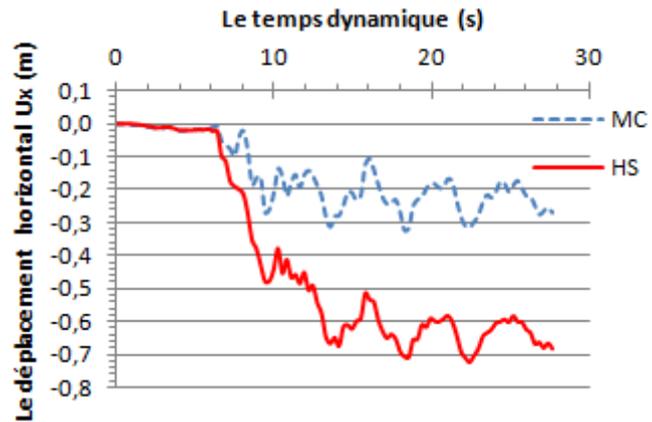
Tableau 1. Caractéristiques des sols utilisés.

## 5. Accélération sismique

On s'est intéressé à l'accélération sismique enregistrée lors du séisme de Boumerdès 2003 (6,8 de magnitude) à la station de Dar El Beida (Algérie) figure 2.



**Figure 2.** Accélérogramme du séisme de Boumerdès 2003 enregistré à la station de Dar El Beida (PGA = 0,5g).



**Figure 3.** Déplacement horizontal du sommet de la digue sous l'accélération 0,5g.

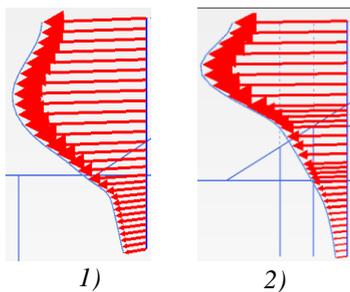
## 6. Résultats

### 6.1. Déplacement horizontal du sommet de la digue sous l'accélération 0,5g

Durant les six premières secondes de l'accélération sismique, le déplacement horizontal obtenu au sommet de la digue est le même pour les deux modèles MC et HS, et il ne dépasse pas -0,02 m. Par la suite, le déplacement varie dans le temps en fonction de l'accélération sismique (figure 3). Le déplacement horizontal maximal obtenu avec le modèle MC est de -0,324m, (enregistré à un temps  $t=18,269s$  sous une accélération  $a=0,755m/s^2$ ). Avec le modèle HS le déplacement horizontal maximal est de -0,724m (enregistré à un temps  $t=22,421s$ , sous une accélération  $a=0,290m/s^2$ ). Ces déplacements se produisent sous des accélérations bien inférieures à l'accélération maximale du chargement sismique. A la fin de l'accélération sismique, on obtient un déplacement horizontal permanent avec les modèles MC et HS respectivement de -0,270m et -0,683m.

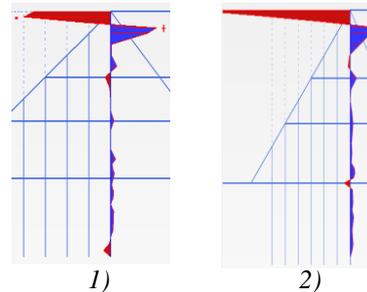
### 6.2. 6.2.5. Les efforts internes des pieux sous l'accélération 0,5g

Les efforts internes obtenus dans les pieux sous l'accélération 0,5g varient d'un pieu à un autre. Pour le déplacement total du pieu, la valeur maximale est obtenue sur le premier pieu (côté mer) de la modélisation avec le modèle MC (figure 4-1). Pour la modélisation avec le modèle HS, le déplacement total maximal est obtenu sur le troisième pieu du quai (figure 4-2). Concernant le moment fléchissant des pieux, les valeurs sont faibles, néanmoins on peut remarquer des valeurs plus importantes sur la partie supérieure des pieux, et plus faibles sur la partie inférieure qui s'annulent en pointe. Le moment fléchissant maximal est enregistré en dessous de la connexion pieu-plateforme sur le dernier pieu du quai, et cela pour les deux modèles de comportement de sol MC et HS (respectivement figure 5-1 et 5-2).



**Figure 4.** Déplacement total

- 1) du premier pieu obtenu avec le modèle MC (la valeur maximale =0,346m)
- 2) du troisième pieu obtenu avec le modèle HS (la valeur maximale =0,873m)



**Figure 5.** Moment fléchissant du dernier pieu

- 1) obtenu avec le modèle MC (la valeur maximale =-3,187 kN/m/m)
- 2) obtenu avec le modèle HS (la valeur maximale =-9,716 kN/m/m)

## 7. Conclusion

La digue subit de grandes déformations en cisaillement sous l'accélération 0,5g du séisme de Boumerdès 2003 enregistrée à la station de Dar El Beida (Algérie), son comportement est donc plastique sans pour autant menacer son effondrement. La simulation effectuée avec le modèle MC nous donne des résultats inférieurs de 55% et 60% à ceux obtenus avec le modèle HS, respectivement pour le déplacement horizontal maximal et le déplacement horizontal permanent au sommet de la digue. Concernant le déplacement total maximal des pieux, le résultat obtenu avec le modèle MC est inférieur de 60% au résultat obtenu avec le modèle HS.

D'une manière générale, les moments fléchissants obtenus sur les pieux sont faibles car ce type de géométrie de digue est considéré comme très stable dans les ouvrages maritimes soumis à des accélérations sismiques [MCC 03]. Le moment maximal enregistré avec le modèle MC est inférieur de 67% par rapport à celui enregistré avec le modèle HS. On note toutefois, l'apparition d'un moment fléchissant important dans la partie supérieure du pieu, en particulier en dessous de la connexion pieu-plateforme, qui est dû à l'accélération maximale à la surface du sol. Cela est constaté par l'accélération maximale au sommet de la digue qui influe sur le moment fléchissant en tête du dernier pieu du quai. Les moments observés en profondeur sont dus à la déformation du sol.

Le modèle Mohr-Coulomb est employé pour obtenir une première évaluation des déformations, mais il est plus avantageux d'utiliser un modèle qui prend en considération plus de paramètres géotechniques et d'autres aspects fondamentaux du comportement des sols. Il convient donc dans notre cas de considérer le modèle HS.

## 8. Remerciement

Nous remercions Daniel DIAS du Laboratoire 3SR (Grenoble, France) pour son aide et ses précieux conseils.

## 9. Bibliographie

- [BES 12] BESSELING F., Soil-structure interaction modelling in performance based seismic jetty design, Final report. M.Sc. Graduation Project. 122 p., 2012.
- [BOL 01] BOLAND J.C., SCHLECHTER S.M., MCCULLOUGH N.J., DICKENSON S.E., KUTTER B.L., WILSON D.W., Data Report: Pile-Supported Wharf Centrifuge Model (SMS02), Oregon State University, 2001.
- [CIH 11] CIHAN K., YUKSEL Y., BERILGEN M., CEVIK E.O., « Behavior of homogenous rubble mound breakwaters materials under cyclic loads », Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011.
- [DUN 70] DUNCAN J.M., CHANG C.Y., « Nonlinear analysis of stress and strain in soil », J. Soil Mech. Found. Div. ASCE96, p. 1629-1653, 1970.
- [KON 63] KONDNER R. L., « Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils », Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.89, No. SM1. Proc. Paper 3429, 1963, p. 115-143.
- [MCC 03] MCCULLOUGH N.J., The seismic geotechnical modeling, performance, and analysis of pile-supported wharves, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Oregon State University, 220 p., 2003.
- [MUR 97] MURALEETHARAN K.K., ARULMOLI K., WITTKOP R.C., FOXWORTHY J.E., « Use of Centrifuge and Numerical Modeling in Design of Pier 400 at the Port of Los Angeles », Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1582, 1997, p. 13-21.
- [PIAN 01] PIANC, *Seismic Design Guidelines for Port Structures*, Permanent International Association for Navigation Congresses, Balkema, 2001.
- [PLA 14] PLAXIS, *Material Models Manual*, Edited by Brinkgreve R.B.J., Engin E. & Swolfs W.M., DELFT University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas, 2014.
- [SCH 99] SCHANZ T., VERMEER P.A., BONNIER P.G., «The hardening-soil model: Formulation and verification », Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam, 1999, p. 281-290.