

ÉVALUATION NUMERIQUE POUR PREDIRE L'EVOLUTION DU MODULE DE CISAILLEMENT ET DE L'AMORTISSEMENT DU SABLE ET SABLE CONSOLIDE DE LA REGION OUEST D'ALGER

NUMERICAL EVALUATION TO PREDICT THE EVOLUTION OF THE SHEAR MODULUS AND DAMPING OF CONSOLIDATED SAND AND SAND IN THE WESTERN REGION OF ALGIERS

Mohamed KHIATINE¹, Ramdane BAHAR²

¹ PhD, Department of Civil Engineering, University Yahia Fares, Medea, Algeria; USTHB, LEEGO, Bab Ezzouar, Algiers, Algeria (khia.med@gmail.com).

² Professor, USTHB, LEEGO, Bab Ezzouar, Algiers, Algeria (bahar_rm@yahoo.fr).

RÉSUMÉ – Les recherches montrent que le comportement du sol est non linéaire et hystérétique. Ce comportement non linéaire du sol peut être caractérisé par des courbes donnant l'évolution du module de cisaillement et amortissement en fonction de la distorsion. Sur la base des données issues de l'analyse des études géophysiques et géotechniques, cette communication présente une analyse numérique à l'aide du logiciel FLAC^{2D} de l'évolution des paramètres dynamiques du sable et sable consolidé de la région de Zéralda, Ouest d'Alger. Le modèle non linéaire proposé par Ramberg-Osgood et limité par le critère de Mohr-coulomb est utilisé.

ABSTRACT – Research shows that soil behaviour is nonlinear and hysteretic. This nonlinear behaviour of the soil can be characterized by curves showing the evolution of the shear and damping modulus as a function of distorsion. On the basis of data from the analysis of geophysical and geotechnical studies, this communication discusses a numerical analysis using FLAC^{2D} software of the evolution of dynamic parameters of consolidated sands and sands in the Zeralda region to the west of Algiers. The nonlinear model proposed by Ramberg-Osgood and limited by the Mohr-coulomb criterion is used.

1. Introduction

Des progrès significatifs dans la dynamique des sols ont été réalisés au cours des dernières décennies, tant dans les études en laboratoire que dans les expériences sur le terrain. Ils ont permis de mieux comprendre le comportement des sols exposés à des charges cycliques, vibratoires, transitoires et dynamiques. Plus important encore, ils ont fourni des techniques fiables pour mesurer les paramètres physiques qui sont essentiels pour les concepteurs de structures dans le calcul du comportement dynamique.

En effet, les problèmes d'ingénierie géotechnique sismique nécessitent souvent la caractérisation des propriétés dynamiques des sols sur une large gamme de déformation intéressant les calculs de réponse sismique des ouvrages de génie civil, lorsque les sols sont soumis à une charge dynamique. La détermination des paramètres dynamiques, en particulier, le module du cisaillement G et d'amortissement D des sols et la connaissance de leurs évolutions des petites aux grandes déformations, et de leur variation suivant les chemins de contraintes deviennent donc des enjeux importants.

Les recherches montrent que la variation du module de cisaillement G en fonction de la déformation est non linéaire. Ce comportement non linéaire du sol peut être caractérisé par des courbes donnant l'évolution du module de cisaillement G et l'amortissement D en fonction de la déformation de cisaillement.

Des courbes de dégradation du module de cisaillement $G(\gamma)/G_{max}$ et de l'évolution de l'amortissement $D(\gamma)$ en fonction de la distorsion sont proposées par différents auteurs pour les sols pulvérulents, cohérents, frottants et cohérents (Seed 1970; Idriss, Dobry et al. 1978; Atkinson and Salfors 1991; Vucetic and Dobry 1991; Ishibashi and Zhang 1993; Tani 1995; Mestat and Reiffsteck 2002; Reiffsteck 2002; Coquillay 2005; Borel and Reiffsteck 2006; Bahar, Saci et al. 2012; Khiatine, Saci et al. 2013; Khiatine, Reiffsteck et al. 2019).

Les essais sur le terrain et en laboratoire consistent à déterminer les paramètres du sol testé en site réel ou sur des ouvrages expérimentaux. Les paramètres identifiés sont ensuite utilisés pour valider les lois de comportement, et ces paramètres sont ensuite utilisés pour des calculs numériques. Dans ce cercle de la recherche, le calcul numérique fait le lien entre les mesures en place et les mesures sur des ouvrages en vraie grandeur en permettant de prédire comportement du sol, structures ou interaction sol-structure en génie civil.

En effet, de plus en plus fréquemment, les méthodes de calcul utilisées sont basées sur la méthode des éléments finis ou différences finis, permettant de modéliser tout type d'ouvrages : talus, fondations superficielles ou profondes, murs de soutènement,... Pour passer au calcul d'un ouvrage, il est nécessaire de décrire le comportement des massifs de sols naturels. Pour atteindre cet objectif, de nombreuses lois de comportement sont proposées.

Cette communication présente une analyse numérique pour évaluer la courbe de dégradation du module de cisaillement $G(\gamma)/G_{max}$ et l'augmentation de l'amortissement $D(\gamma)$ avec l'amplitude de déformation en cisaillement cyclique de la couche du sable et sable consolidé de la région de Zéralda, localisé à l'Ouest de la Wilaya d'Alger, en utilisant des données résultant d'études géophysiques et géotechniques. Il s'agit de l'identification numérique de ces courbes en utilisant le code FLAC^{2D}. Le modèle élastique non linéaire proposé par Ramberg-Osgood et limitée par le critère de Mohr-coulomb est utilisée (Bagagli, Vincens et al. 2010). Les courbes empiriques données par Seed et Idriss (1970) pour les matériaux granulaires ont été utilisé pour calibrer les paramètres du modèle.

2. Site expérimental : région de Zéralda, côté Ouest du littoral d'Alger

1.1. Localisation et morphologie de la zone d'étude

La région de Zéralda est une ville d'Alger située au bord de la Méditerranée, à environ 30 km à l'ouest de la capitale Alger et 50 km à l'Est de Tipasa. Elle est située entre les municipalités de Mahelma, Souidania, Staoueli et Rahmania dans la Mitidja (Figure 1). Le Sahel occidental d'Alger, désigne un ensemble morfo-structural d'âge Plio-pléistocène, orienté d'Est en Ouest et constitué d'une série de plateaux interrompus par le massif Bouzarea à l'Est et le massif Chenoua à l'Ouest (Figure 1). La région de Zéralda est située sur la zone côtière de l'anticlinal sahélien, qui fait partie du Sahel occidental et fait partie de l'Atlas côtier de Tellian.



Figure 1. Morpho-structurales du Sahel occidental d'Alger.

1.2. Contexte géologique

Géologiquement, la cartographie (Figure 2) et les forages réalisés dans la région ont permis d'identifier les trois principales formations géologiques suivantes :

- Les formations actuelles composées de sables de plage, de dunes de courant, d'alluvions récentes et de sables rouges.
- Le Quaternaire formé par des terrasses marines (dunes consolidées, grès marins poudreux et coquilliers, alluvions anciennes) et des terrasses marines calabraises (alluvions anciennes) ainsi que le Villafranchien formé par la marne jaune.
- Le Tertiaire représenté par le Pliocène qui apparaît sous une formation caractérisée par un faciès marneux à la base du Plaisancien (marnes bleues).

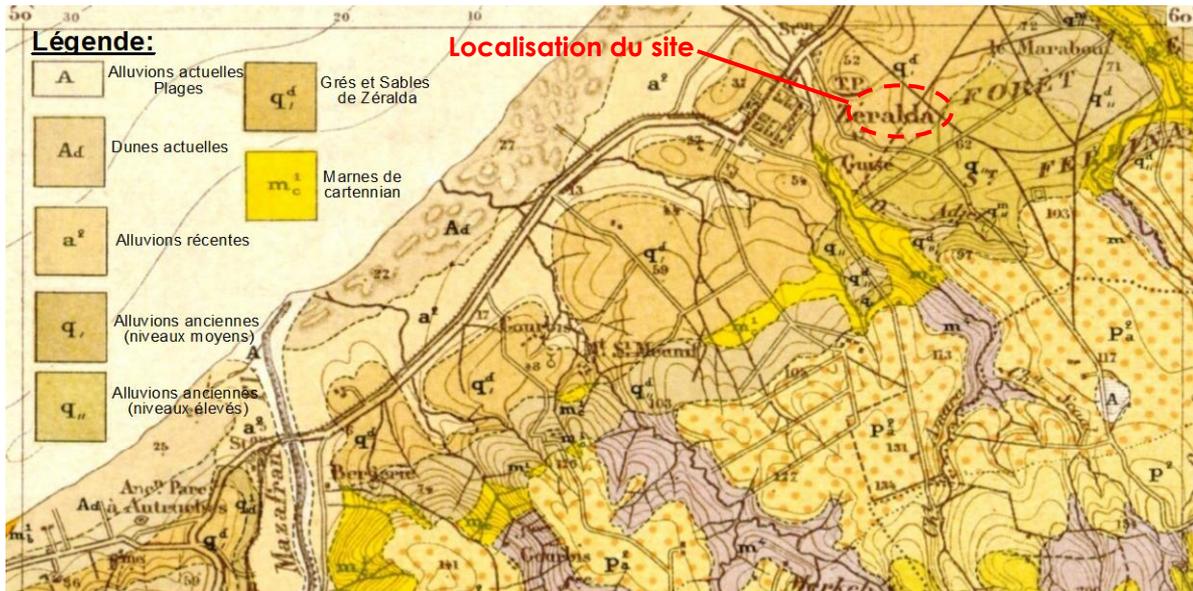


Figure 2. Extrait de la carte géologique détaillée n° 41 de Koléa à l'échelle 1/50 000, feuille a été publiée en 1911 par le service Géologique de l'Algérie (M. Ficheur et M. Jacob).

1.3. Tectonique et sismicité

Le nord de l'Algérie fait partie de la ceinture tectonique alpine méditerranéenne où certaines régions ont une activité sismique importante. Les caractéristiques sismo-tectoniques de la région d'Alger montrent qu'elle est caractérisée par une activité tectonique sous forme de séismes de plus ou moins de grande ampleur. Cette sismicité est liée aux mouvements différentiels des failles actives, comme en témoigne l'élévation des terrasses quaternaires. La plus connue de ces failles est celle de Bouzaréah (M=6,5). La zone étudiée est située dans une zone classée en zone III, c'est une zone à forte sismicité selon la nouvelle classification sismique des Wilayas d'Algérie faite par le Centre National de Recherche en Génie Parasismique C.G.S après le dernier séisme du 21 mai 2003 (RPA 2003).

1.4. Caractéristiques géotechniques

Le projet de bibliothèque Arabo-Sud-Américaine est l'un des projets culturels les plus importants de la ville de Zéralda, couvrant une superficie de près de 4 hectares. Le site a fait l'objet d'une campagne d'investigation géotechnique en 2013. Cette étude géotechnique comprenait sept sondages de 30 m de profondeur, deux cent dix essais de pénétration standard (SPT), huit essais de pénétration dynamique lourd (PDL), six sondages de 1 à 30 m ou environ cent soixante et un mesures avec réalisation d'essais en laboratoire (identification physique, limites Atterberg, analyses granulométriques, essais mécaniques et analyses chimiques).

L'examen des coupes lithologiques des sondages confirme la cartographie géologique et donne le modèle de terrain montré sur la figure 3. Les sondages géotechniques révèlent que le sol est constitué, sous une couche de sable limoneux légèrement argileux, rougeâtre à ocre d'une épaisseur allant de 0,5 à 3,0 m ; on trouve une alternance de bancs de grès et de sable consolidés, sur une épaisseur allant de 6,00 à 17,00 m avec une moyenne de 14,0 m, couleur beige à jaune, avec présence au fond d'une couche de sable, gravier et galets cimentés. Ces dépôts continentaux (dunes de sable consolidé à limon rouge) reposent sur un substratum marneux de couleur grise. Une présence d'eau a été détectée lors des travaux d'investigation entre 9 et 14 m de profondeur. Le relief topographique et la nature du sol sur les premiers mètres permettent efficacement l'accumulation d'eau sur le toit marneux imperméable.

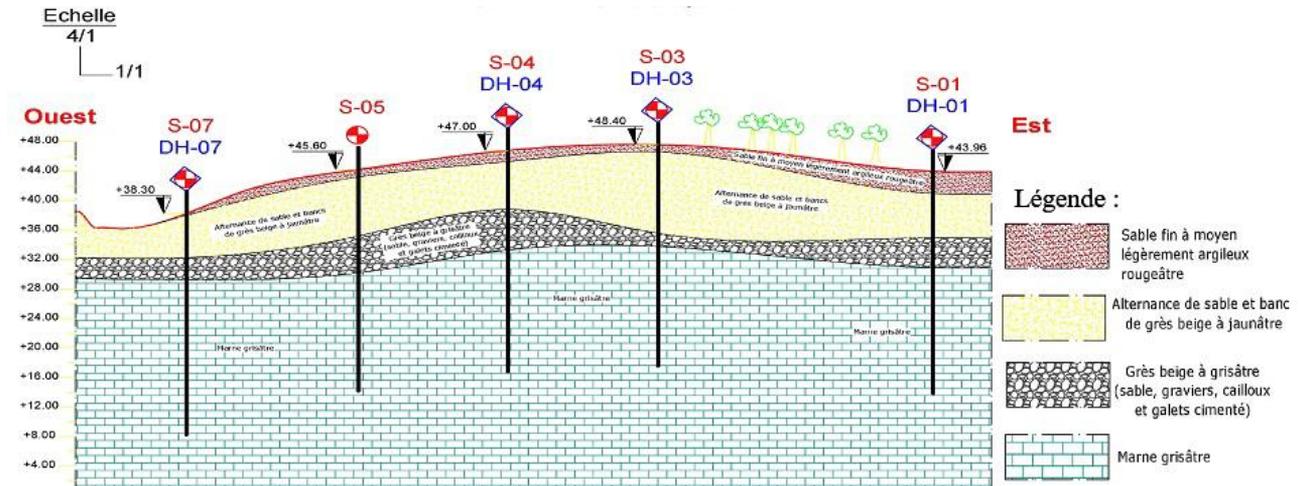


Figure 3. Coupe lithologique A-A' de la zone d'étude de Zéralda.

Les résultats d'essais de pénétration dynamique montrent que le sol sur l'ensemble du site est caractérisé par des résistances dynamiques en pointe supérieures à 50 bar à partir d'une profondeur de 2,00 m, à l'exception du PD1 où de faibles valeurs ont été enregistrées sur les cinq premiers mètres de profondeur.

Les paramètres déduits à partir des essais de pénétration standard (SPT) et Down hole sont donnés à la figure 5. La couche de sable consolidé est caractérisée par un nombre de coups N_{SPT} compris entre 16 et 60, une compacité moyenne à très dense et un angle de frottement compris entre 32 et 42°. Les grès sont caractérisés par un indice N_{SPT} supérieur à 80. Pour cette valeur, l'angle de frottement est d'environ 45° selon le diagramme de Peck. Le substratum marneux grisâtre est caractérisé par un nombre de coups de N_{SPT} compris entre 22 et 70, et plus de 80 à des endroits correspondant à des consistances très dures avec des résistances à la compression entre 400 et 800 kPa.

Selon Meyerhof (1956), la formation superficielle sur les 14 premiers mètres de profondeur est caractérisée par un nombre de coups N_{SPT} compris entre 20 et 45 coups avec une valeur moyenne de l'ordre de 35, correspond à des densités relatives entre 40 et 60%. Cependant, la couche de marne est caractérisée par un nombre de coups N_{SPT} compris entre 40 et 80 correspondant à des densités relatives supérieures à 60%.

Sur le plan géophysique, les dépôts superficiels (limon rouge, grès et dunes de sable consolidées) se caractérisent par une vitesse de cisaillement moyenne d'environ 1265 m/s pour la vitesse de compression et de 436 m/s pour la vitesse de cisaillement. La valeur du module dynamique est d'environ 335 MPa pour le module de Young et oscille autour de 895 MPa pour le module de cisaillement ; pour les marnes cartennianes, la vitesse moyenne de compression est d'environ 2098 m/s et la vitesse de cisaillement est d'environ 880 m/s. La valeur du module d'élasticité dynamique moyen atteint 3543 MPa pour le module de Young et oscille autour de 1549 MPa pour le module de cisaillement.

Les échantillons intacts ont été soumis à des essais physiques et mécaniques en laboratoire. Les résultats de ces essais sont présentés à la figure 4 et au tableau 1. Les formations géologiques superficielles du site, composées de sables et de sables consolidés alternés, sont caractérisées par des densités moyennes à élevées. L'analyse granulométrique effectuée sur les échantillons prélevés sur les 14 premiers mètres de profondeur a généralement révélé un sol à prédominance de sable moyen à fin.

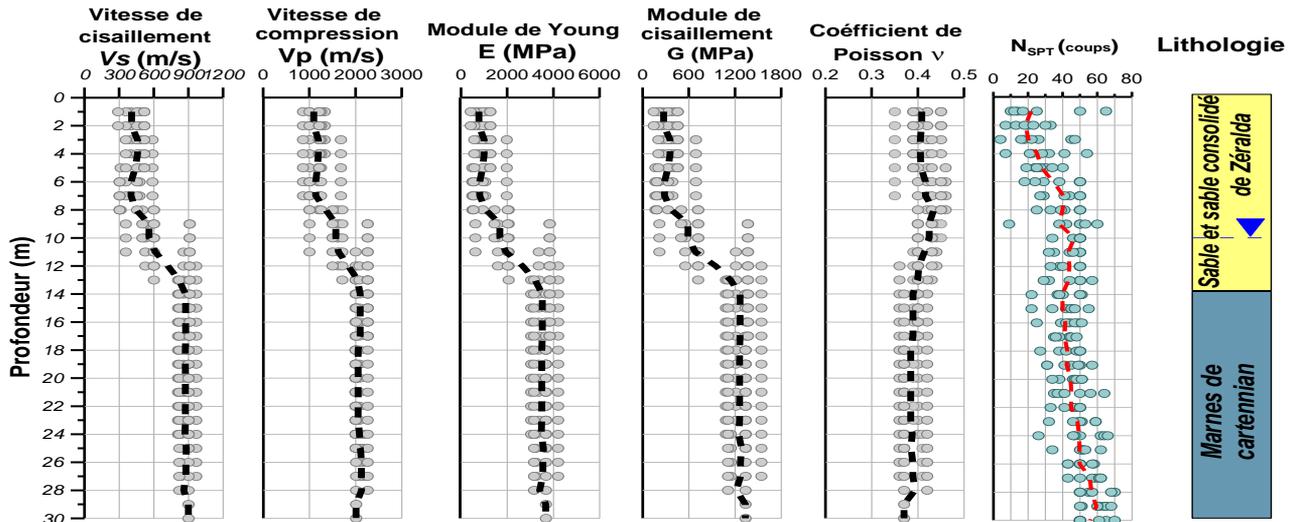


Figure 4. Résultats des essais SPT et Down hole exécutés dans la zone d'étude de Zéralda.

Tableau 1. Propriétés physiques et mécaniques des sols en place (zone d'étude de Zéralda).

Sond -age	Profondeur (m)	Description	W (%)	γ_d (kN/m^3)	γ_h (kN/m^3)	W _L	W _P	I _p	P _c (kPa)	C _c (%)	C _g (%)	C (kPa)	ϕ (°)
S-01	2.00-2.45	Sable limono-argileux	-	16.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	22.1-22.6	Marne grisâtre	22.2	16.8	20.53	43	22	21	-	-	-	94	14.2
B-02	3.00-3.45	Sable consolidé	-	17.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5.00-5.45	Sable consolidé	-	18.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-03	18.5-19.0	Marne grisâtre	24.6	16.3	20.31	45	24	21	4.17	12.9	3.25	58	13.3
	4.00-4.45	Sable consolidé	-	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-07	2.00-2.45	Sable consolidé	-	17.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9.50-9.80	Marne grisâtre	20.7	16.7	20.16	49	26	23	2.11	14.3	4.20	48	11.8

3. Analyse numérique

Le modèle d'hystérésis de Ramberg-Osgood (1943) est adoptée et limitée par le critère de Mohr Coulomb. La formulation entre contrainte de cisaillement et distorsion permet de simuler la non-linéarité même dans le domaine élastique des matériaux et prendre en compte la dissipation de l'énergie dans le sol sous sollicitations cycliques (Figure. 5).

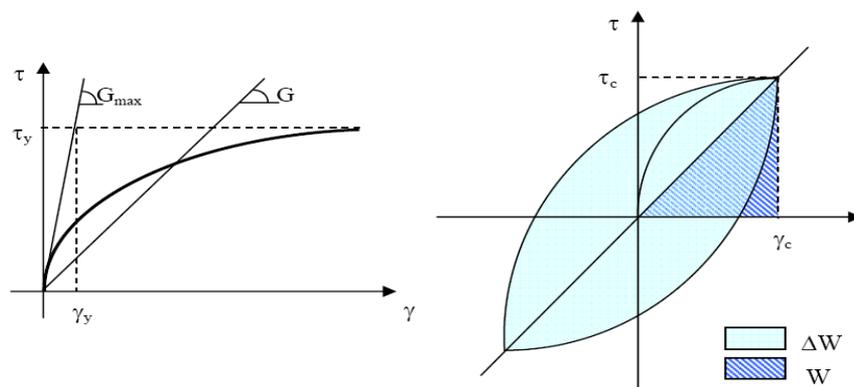


Figure 5. Modèle de Ramberg Osgood : boucle d'hystérésis et dissipation d'énergie. La formule classique de Ramberg-Osgood s'écrit :

$$\gamma - \gamma_c = \frac{1}{G_{\max}} \left[1 + \alpha \left(\frac{|\tau - \tau_c|}{n\tau_y} \right)^{r-1} \right] (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

α et r sont des constantes. γ_c et τ_c sont les coordonnées des extrémités de la boucle (voir Figure 6). G et τ décrivent la boucle d'hystérésis (Figure 6). n est égal à 1 lors du premier chargement, puis est égal à 2. La relation contrainte-déformation constitutive à l'aide de la formulation de Ramberg-Osgood (RO) est entièrement spécifiée, soit le module de cisaillement à très petites déformations, G_{\max} , une déformation de référence γ_y , et des constantes α et r . La contrainte de cisaillement limite τ_y est liée à la déformation de référence, γ_y par la relation:

$$\tau_y = G_{\max} \gamma_y \quad (2)$$

Le coefficient d'amortissement D est défini par l'énergie dissipée par le matériau pendant un cycle fermé par la formule :

$$D = \frac{\Delta W}{4\pi W} = \frac{2}{\pi} \frac{r-1}{r+1} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \quad (3)$$

Où :

ΔW : énergie dissipée lors d'un cycle de chargement,

W : énergie élastique stockée en fin de cycle.

L'objectif de l'identification des sols est d'obtenir les paramètres du modèle élastoplastique à partir de ces courbes expérimentales. La méthodologie d'identification des paramètres des modèles proposée dans cette étude est :

Dans la première étape, les paramètres de la loi Ramberg Osgood, r et α , sont identifiés au moyen d'une procédure pratique développée en comparant la courbe G/G_{\max} donnée par cette loi et la courbe expérimentale G/G_{\max} . En l'absence d'expérimentation de ces courbes $G(\gamma)$ et $D(\gamma)$ pour les sols Algériens, l'identification des paramètres du modèle, r et α , est basée sur les courbes expérimentales proposées par Seed et Idriss (1970) pour les matériaux granulaires. L'évaluation du module de cisaillement maximal est déterminée à partir de méthodes géophysiques, souvent utilisées pour caractériser les propriétés dynamiques du sol, en particulier les essais en fond de sondages.

Dans une deuxième étape, le comportement cyclique d'un profil de sol est simulé à l'aide du code numérique FLAC^{2D}, en tenant compte de la loi de Ramberg-Osgood limitée par le critère de Mohr Coulomb. L'angle de frottement, la cohésion c et la contrainte moyenne effective p' sont caractérisées par les propriétés physiques et mécaniques définies à partir de l'étude géotechnique (Tableau 2).

Tableau 2. Paramètres géotechniques et géophysiques du modèle.

Couches de sol	Epaisseur (m)	ρ (kg/m ³)	C (kN/m ²)	φ (°)	l_p	N_{SPT}	r	α	V_s (m/s)	G_{\max} (MPa)	ν	K_{\max} (MPa)
Sable et sable consolidé	0.00 – 14.0	1760	-	35	-	35	2.2	1.4	436	335	0.42	1982
Marne	14.0 – 30.0	2000	65	13	21.6	>44	2.1	0.15	880	1549	0.39	6525

Le terrain est supposé être constitué de plusieurs couches horizontales, qui sont homogènes et d'étendue infinie horizontalement, la colonne de sol s'étendant de la surface du sol jusqu'à le substratum marneux. Le maillage du profil du sol est composé de 30 éléments rectangulaires de un mètre d'épaisseur et de largeur. Le maillage du

modèle de colonne de sol est choisi de manière à assurer la précision de la mesure de transmission des ondes.

Les tremblements de terre ou les fonctions sinusoïdales mono-harmoniques sont supposés générer seulement le mouvement horizontal à la base de la colonne du sol, et pour produire des ondes de cisaillement qui se propagent verticalement dans les couches du sol. La figure 6 montre la prédiction du modèle pour quatre amplitude d'accélération.

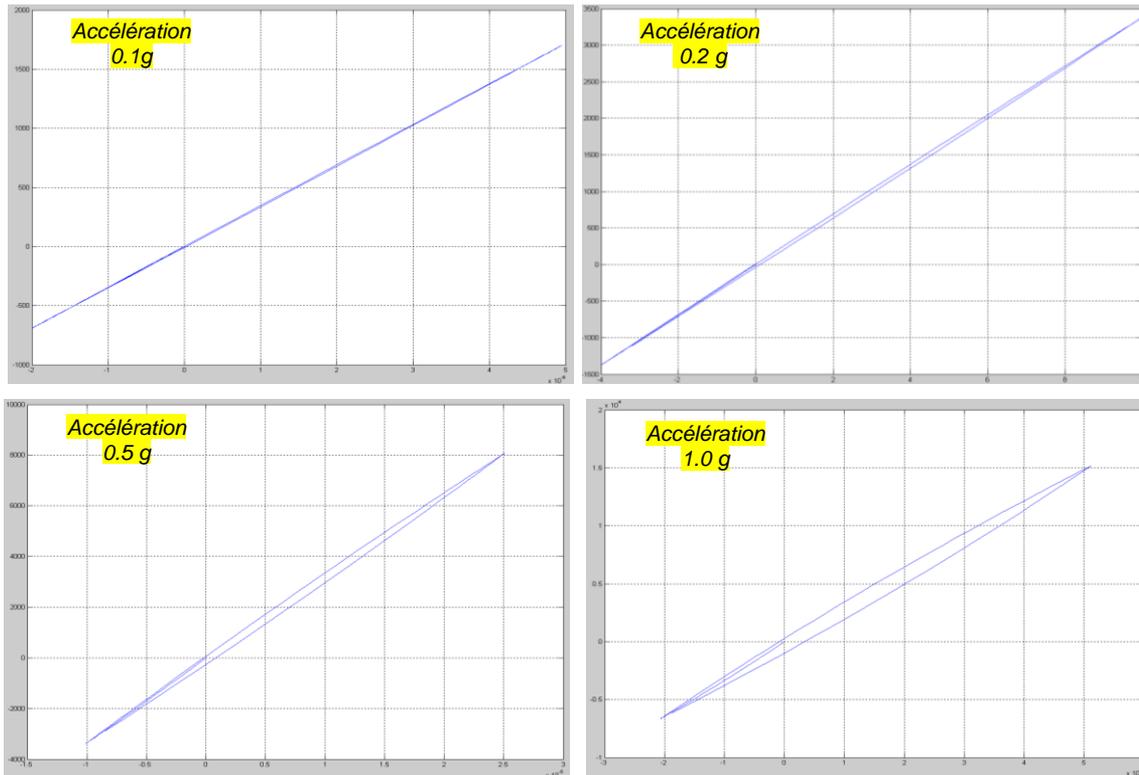


Figure 6. Courbes numériques de la boucle d'hystérésis $\tau=f(\gamma)$ en fonction de l'accélération.

Les résultats illustrent la capacité du modèle à s'adapter à la rigidité non linéaire du sol et on peut noter qu'avec l'augmentation de l'amplitude de l'accélération, les boucles de chargement sont de plus en plus inclinées vers l'horizontale ce qui met en évidence la dégradation du module de cisaillement. La surface de la boucle hystérésis augmente proportionnellement à l'évolution de l'amplitude de l'accélération, ce qui explique l'augmentation du rapport d'amortissement D en fonction de la distorsion. Les figures 7.a et 7.b montrent que le modèle de Ramberg-Osgood est mieux adaptée pour les sables, en comparaison la courbe obtenue par le calcul numérique à l'aide du code FLAC^{2D} et les courbes empiriques données par Seed et Idriss (Seed 1970).

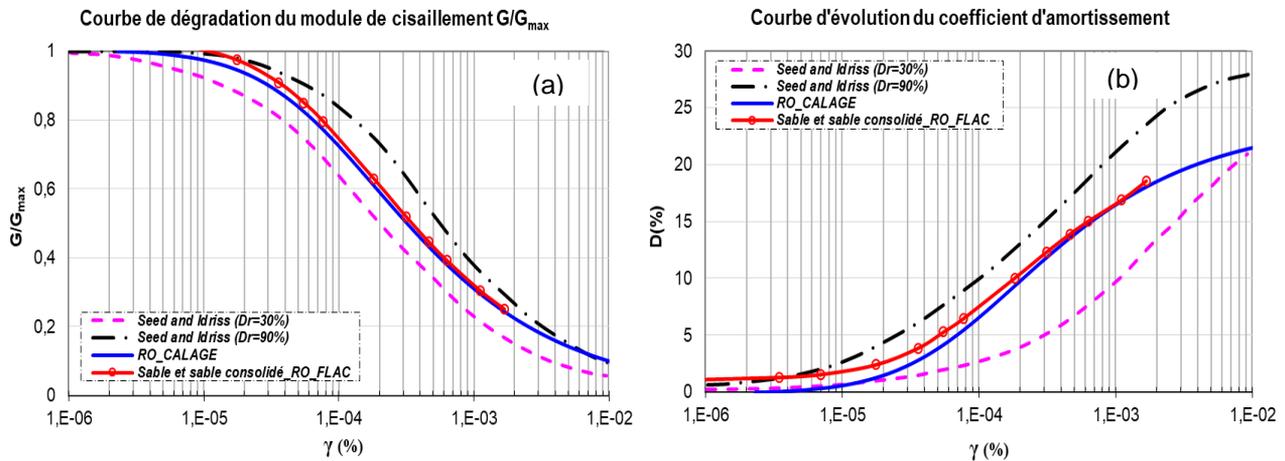


Figure 7. Dégradation du module de cisaillement (a) et évolution des courbes de taux d'amortissement (b) pour le sable consolidé de densité relative de l'ordre de 60%.

4. Conclusions

L'analyse dynamique du sol sableux effectuée à l'aide du code FLAC^{2D} fait à ressortir la potentialité du modèle Ramberg-Osgood, limité par le critère de Mohr Coulomb, de décrire les courbes de dégradation du module de cisaillement et les courbes d'évolution de l'amortissement en fonction de la distorsion des sols granulaires (sable). Cette méthode peut constituer une approche préliminaire pour estimer ces courbes ou servir de point de départ pour les situations où les mesures géotechniques sont insuffisantes pour déterminer les modules dans la gamme des déformations supérieures à 10^{-4} .

5. Références bibliographiques

- Atkinson, J. and G. Salfors (1991). Experimental determination of soil properties (stress-strain-time). Proc. 10th Eur. Conf: Soil Mech., Florence.
- Bagagli, Y., E. Vincens, et al. (2010). "A model for the computation of engineering earth structures to a seismic motion." European Journal of Environmental and Civil Engineering 14(5): 599-616.
- Bahar, R., L. Saci, et al. (2012). Numerical evaluation of shear modulus degradation and damping curves of Algerian soils using geophysical tests. 15 th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal.
- Borel, S. and P. Reiffsteck (2006). "Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place." Etudes et recherches des Laboratoires des ponts et chaussées. Série Géotechnique.
- Coquillay, S. (2005). Prise en compte de la non linéarité du comportement des sols soumis à de petites déformations pour le calcul des ouvrages géotechniques, Ecole des Ponts ParisTech.
- Idriss, I. M., R. Dobry, et al. (1978). "Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 104(ASCE 14265).
- Ishibashi, I. and X. Zhang (1993). "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay." Soils and Foundations 33(1): 182-191.
- Khiatine, M., P. Reiffsteck, et al. (2019). "Evaluation of Dynamic Soil Properties for Alluvial Plain of Bejaia Using Field Data and Laboratory Tests." Geotechnical and Geological Engineering: 1-24.
- Khiatine, M., L. Saci, et al. (2013). Evaluation of dynamics properties and liquefaction potentiel of silty sand in harbour of Bejaia, Algeria. Proc. 2nd European Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering and Seismology.

- Mestat, P. and P. Reiffsteck (2002). Modules de déformation en mécanique des sols: définitions, détermination à partir des essais triaxiaux et incertitude. PARAM 2002-Symposium International identification et détermination des paramètres des sols et des roches pour les calculs géotechniques, Paris, 2-3 Septembre 2002.
- Reiffsteck, P. (2002). Nouvelles technologies d'essai en mécanique des sols-Etat de l'art. Param 2002-Symposium International identification et détermination des paramètres des sols et des roches pour les calculs géotechniques, Paris, 2-3 septembre 2002.
- RPA, R. P. A. (2003). "version 2003." Règlement Parasismique Algérien.
- Seed, H. B. (1970). "Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis." EERC.
- Tani, K. (1995). General report: Measurement of shear deformation of geomaterials-Field tests. General report : Measurement of shear deformation of geomaterials – Field tests, Pre-failure Deformation of Geomaterials, Shibuya, Mitachi & Miura(eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 399 X, pp.1115-1135.
- Vucetic, M. and R. Dobry (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response." Journal of geotechnical engineering 117(1): 89-107.