

Analyse numérique du comportement d'un pieu isole tridimensionnel charge latéralement en milieu pulvérulent

P.Mpan^(a) et D.Levacher^(b)

 ^(a)Ingénieur, Docteur en Génie-civl (e-mail: <u>placide.mpan@univ-rennes1.fr</u>)
 Université de Caen-Groupe de Recherche en Genie civil-Unité Morphodynamique Continentale et Cotiere-M2C-UMR 6143-CNRS-24 Rue des Tilleuls-14000 Caen- (France)
 ^(b)Professeur, Docteur-Ingénieur en Génie-civil (e-mail: daniel.levacher@geos.unicaen.fr) Université de Rennes1-IUT Génie Civil-BP.90422-Rennes Cedex 7-(France) Correspondance à :P. MPAN, Université de Rennes1-IUT Génie-civil-BP. 90422-Rennes Cedex 7 - Fax : 02.23.23.40.51- Tel : 02.23.23.40.56

<u>Résumé</u>

Une étude comparative aux éléments finis tridimensionnels a été développée sur l'évolution du profil des déplacements d'un pieu isolé battu dans un massif sableux sous un chargement latéral statique. Deux lois de comportement schématisent le comportement du sol à savoir, une loi de comportement élastique linéaire isotrope et homogène, et une loi élastoplastique de type Mohr-Coulomb. Les résultats numériques sont validés par une confrontation avec ceux issus des mesures en centrifugeuse sur le même pieu.

Abstract

In this paper, a 3-D comparative study is carried out about a driven pile deflexion evolution in sand under static lateral loading. The soil is modelled according to linear isotropic homogeneous behavior law and Morh-Coulomb elastoplastic behavior law. Numerical results from finite elements calculations are compared with centrifuge measurements to validate the problem theoretical approach..

<u>Mots-clés:</u>Eléments finis 3-D ; pieu-sol ; chargement latéral ; comportement ; centrifugeuse ; sable.

Keywords: 3-D finite elements; pile-soil ; lateral loading; behavior ; centrifuge ; sand .

<u>1.Position du problème</u>

Très souvent utilisés en groupe, la fonction d'un pieu dans une fondation est de transmettre aux couches du sol les plus résistantes, les charges extérieures et celles qui sont dues à la construction. La modélisation numérique par éléments finis du comportement d'un pieu isolé en milieu pulvérulent a déjà certes fait l'objet de plusieurs travaux de recherche (Ata[1], Brown *et al*[2], Mpan[3], Shahrour[4], Sujit *et al*[5], Wakai *et al*[6],...) dont les objectifs sont très souvent à partir d'une seule loi de comportement du sol, la construction des courbes P-y. En recourant à deux lois de comportement, lesquelles sont pour un matériau donné, en l'occurrence le sol, l'expression de la relation entre la contrainte et la déformation (et éventuellement d'autres variables d'état comme le taux de déformation,...), le problème consiste ici à valider à partir des mesures en centrifugeuses sur un même pieu, les résultats issus de la modélisation numérique sous un chargement latéral statique des profils de déplacement d'un pieu isolé cylindrique en acier de diamètre prototype B de 0.72m, de longueur totale, L_p égale à 15.20m, mis en œuvre par battage dans un massif de sol sableux

homogène, pour une fiche de 12m, et libre au-dessus de la surface horizontale du massif sur une hauteur de 3.20m.

Le comportement du sol du massif est schématisé selon une loi élastique linéaire et une loi élastoplastique. Le pieu étudié est libre en tête et en pied sans aucun mouvement de rotation, comme illustré sur la figure 1.



Massif de sol homogène

Figure 1. Système pieu-sol

2.Maillage du Pieu-sol et conditions aux limites et de calcul

La figure 2 montre le système pieu-sol discrétisé dans l'espace en 9562 nœuds pour 2028 éléments répartis en 1884 hexaèdres à 20 nœuds et 144 pentaèdres à 15 nœuds. La zone du massif s'étend latéralement sur 5 mètres de part et d'autre de son axe de symétrie correspondant à une distance supérieure à 6B au-delà de laquelle il n'y a aucun effet dû au chargement latéral. Sa profondeur est de 14.80 mètres dont 2.80 mètres sous le pieu. En ce qui concerne les conditions aux limites et de calcul ; les déplacements verticaux et horizontaux du système pieu-sol sont nuls sur les limites du modèle autrement dit, u = v = w = 0respectivement sur les limites en X, Y et Z. Et d'autre part, en raison de la symétrie du problème par rapport à l'axe du chargement, tous les calculs ont été menés sur la moitié du modèle présenté.



Figure 2. Modèle tridimensionnel du système pieu-sol

3. Etude numérique du système Pieu-sol dans un massif de sol élastique

3.1.Modélisation du Pieu et du sol

Le matériau constituant le pieu est modélisé par une loi de comportement élastique linéaire et isotrope. Les caractéristiques mécaniques introduites pour le calcul sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau 1.	Caractéristiques	mécaniques	du pieu
1	e an acter istriques	meeeunquee	an pron

Ер	ρ _p	vp
Module d'élasticité [MPa]	Masse volumique [kg/m ³]	Coefficient de Poisson [-]
21x10 ⁶	7800	0.3

Le sol du massif sableux est modélisé par une loi de comportement élastique linéaire isotrope et homogène. les paramètres modélisant le sol et introduits pour le calcul sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 2. Paramètres modélisant le sol comme milieu élastique linéaire

E _S Module de Young [MPa]	γ _d Poids volumique [KN/m ³]	V _s Coefficient de Poisson	K ₀ Coefficients de pression des terres au repos (-)
23	18	0.37	0.45

3.2.Chargement latéral

Le chargement latéral est statique monotone, et comporte des efforts ponctuels appliqués à 1.60 mètres au-dessus du sol par palier sans prise en compte des déplacements initiaux. Chaque chargement est appliqué de manière continue monotone pour la valeur retenue du palier. Les différentes amplitudes d'efforts latéraux appliqués au pieu sont : 97kN ; 261 kN ; 541 kN ; 870 kN.

3.3.Déplacements latéraux du Pieu en milieu élastique

La figure 3 montre l'évolution des déplacements latéraux du pieu battu dans un sol élastique sous l'amplification du chargement latéral. On constate que les plus grands déplacements du pieu se produisent en surface avec l'amplification du chargement. La valeur maximale est donnée par le niveau de chargement le plus élevé. A partir de la profondeur z =3.88 B (2.80m), les courbes de déplacement décroissent progressivement. Ceci montre l'insensibilité relative de la pointe du pieu à l'effet du chargement avec l'amplification des charges appliquées.



Figure 3. Evolution numérique des déplacements latéraux du pieu isolé en milieu élastique linéaire isotrope et homogène

4. Etude numérique du système Pieu-sol dans un massif de sol élastoplastique

4.1.Modélisation du Pieu et du Sol

Le matériau constituant est modélisé comme précédemment par une loi de comportement de type élastique linéaire isotrope, et les paramètres introduits pour le calcul sont donc inchangés. En revanche, le sol est ici modélisé selon une loi de comportement élastoplastique de type Mohr-Coulomb. Ainsi, les paramètres modélisant le sol comme milieu élastoplastique sont résumés dans le tableau ci-après.

E _P Module de Young [MPa]	γ _d Poids volumique [KN/m ³]	ν _s Coefficient de Poisson [-]	φ Angle de frottement [°]	Ψ Angle de dilatance [°]	K ₀ Coefficients de pression des terres au repos [-]
23	18	0.37	38	5	0.45

Tableau 3. Paramètres modélisant le sol comme milieu élasto-plastique

4.2. Chargement latéral

Constitué des mêmes efforts latéraux statiques appliqués que précédemment (cf.3.2), les conditions d'application de ceux-ci restent inchangées, c'est-à-dire que ces efforts sont toujours appliqués par palier sans prise en compte des déplacements initiaux.

4.3.Déplacements latéraux du Pieu en milieu élastoplastique

La figure 4 montre l'évolution des déplacements latéraux du pieu isolé battu dans un sol élastoplastique sous l'amplification du chargement latéral. On constate que les plus grands déplacements du pieu sont atteints en surface avec l'amplification du chargement. La valeur maximale du déplacement est donnée par le niveau de chargement le plus élevé. A partir de la profondeur z=4.16B (3m), les courbes de déplacement décroissent progressivement, marquant ainsi, l'insensibilité relative de la pointe du pieu à l'effet du chargement avec l'amplification des charges appliquées.



Figure 4. Evolution numérique des déplacements latéraux du pieu isolé en milieu élastoplastique

5. Comparaison des résultats numériques en milieu élastique et élastoplastique

La figure 5 rassemble les profils de courbes de déplacements latéraux comparés du pieu battu en milieu élastique et élastoplastique sous l'amplification du chargement latéral. On constate que les plus grandes déformées du pieu se produisent dans les deux milieux en surface avec l'amplification des charges appliquées. Les courbes comparées ont un point d'équilibre situé dans le massif à une profondeur, z = 4.16B (3m) à partir duquel les déplacements commencent à se stabiliser. Ceci montre qu'il n'y a plus effet du chargement imposé sur le pieu. Les valeurs des déplacements les plus élevés sont toutefois obtenus par le modèle numérique élastoplastique adopté. Les écarts constatés entre les 2 hypothèses du modèle numérique sont dressés dans le tableau ci-après.

Charges appliquées [kN]	Ecart entre le modèle élastoplastique et le modèle élastique [%]
97	27.92
260	21.56
541	16.06
870	24.25

Tableau 4 . Différence des déplacements latéraux numériques du _l	oieu
--	------



Figure 5. Courbes numériques comparées des déplacements latéraux du pieu isolé en milieu élastique et élasto-plastique

6.Comparaison des résultats numérique et éxpérimentaux

Les résultats des mesures expérimentales utilisées dans cette analyse résultent des essais menés à une accélération ègale à 40g en centrifugeuse géotechnique du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées de Nantes sur des pieux isolés de même type battus dans un sable dense de Fontainebleau de densité égale à 16.17 kN/m^3 , de densité relative égale à 0.81[7]. La figure 6 rassemble ainsi, les profils comparés de courbes de déplacements latéraux issues des mesures physique en centrifugeuse et celles qui sont issues des calculs numériques aux éléments finis dans l'hypothèse d'un sol à comportement élastique linéaire et d'un sol à comportement élastoplastique de Mohr-coulomb. On constate que les plus grandes déformées du pieu dans les 2 modèles numériques et physique se produisent en surface avec l'amplification du chargement. Mais les plus grandes valeurs de ces déplacements sont obtenues en surface par le modèle numérique élastoplastique avec l'amplification des charges appliquées. Les courbes comparées ont un point d'équilibre situé dans le massif à z = 4.16B (3m) à partir duquel les déplacements commencent à se stabiliser. Ceci montre qu'il n'y a plus effet du chargement imposé sur le pieu. Le tableau ci-après dresse les écarts constatés entre les modèles numériques et le modèle physique.

Charges appliquées [kN]	Ecart entre le modèle élasto- plastique et le modèle physique[%]	Ecart entre le modèle élastique et le modèle physique[%]
97	1.05	27.15
260	1.7	20.20
541	6.38	10.34
870	1.96	22.73

Tableau 6. Différence entre Modélisation numérique et physique



Figure 6. Courbes numériques et expérimentales comparées des déplacements latéraux du pieu isolé

7.Conclusion

L'analyse comparative présentée sur l'évolution des profils de déplacement du pieu isolé sous l'amplification du chargement latéral statique selon 2 hypothèses de schématisation du comportement du sol a montré que partant des mêmes paramètres, les plus grandes déformées du pieu se produisent en surface.

Les résultats numériques comparés entre eux montrent une supériorité des résultats issus du modèle élasto-plastique par rapport à ceux obtenus par le modèle élastique linéaire isotrope et homogène. Par ailleurs, les valeurs des déplacements issues du modèle numérique élastique linéaire comparées aux mesures expérimentales sont inférieures, alors que dans le même temps, celles qui sont issues du modèle numérique non-linéaire élasto-plastique sont supérieures. Force est de constater que dans l'usage des modèles numériques linéaire et nonlinéaire, les paramètres sont comme autant de « talons d'Achille » dans une loi de comportement, et l'on affirmerait sans risque de se tromper que celle-ci est d'autant plus fiable que ses paramètres sont nombreux.

En effet, du fait même de la différence numérique des paramètres qui les constituent, les lois de comportement du sol peuvent considérablement influer sur les résultats. Les différences constatées sont certes, imputables aux hypothèses de départ, mais aussi à quelques

phénomènes que l'on ne peut pas intégrer dans les calculs tels que, l'effet du battage, le module de réaction du sol, la différence de densité du sol,...etc.

Reste une dernière question qui ne peut-être éludée, à savoir d'une part, celle du choix d'une loi de comportement élastique dans la prévision du comportement d'un ouvrage en pieux, et d'autre part, celle de la valeur pratique de la simulation numérique vis-à-vis de l'expérimentation. On ne peut croire aux calculs que lorsqu' on y voit à la fois un instrument qui abrège le chemin et un moyen puissant d'expression entre l'imaginaire, c'est-à-dire, les schématisations et les opérations de l'esprit humain, et le réel. Ce réel qui n'est ici autre que l'observation, l'expérimentation sur la matière, est donc un outil et un moyen indispensable pour mieux orienter et contrôler la pensée humaine.

A ce titre, modéliser le sol comme un matériau élastique dans la prévision du comportement ou le calcul d'ouvrages en pieux est une entreprise périlleuse pour le concepteur, car le choix d'une telle loi ne garantirait pas à long terme les irréversibilités du comportement du sol c'est-à-dire les éventuelles déformations cumulées dues aux charges latérales en présence.

8.Références

1.Ata N. (1998). Etude du comportement de micropieux sous chargement latéral : construction numérique des courbes P-y. Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille.

2.Brown D. A. and Shie C. F. (1991). Some numerical experiments with a three dimensional finite element model of laterally loaded pile. Computers and Geotechnics, 12, 149-162.

3.Mpan P. (2001). Contribution à la modélisation numérique et physique du comportement d'un pieu isolé sous chargement latéral dans un sable sec. Thèse de doctorat, Université de Caen.

4.Shahrour I. (1989). Evaluation des méthodes de calcul des pieux chargés latéralement. Rapport de l'Institut Français du Pétrole, 37226.

5.Sujit K., Bhowmik ., Asce S. M. and LONG J. H. (1991). An analytical investigation of the behavior of laterally loaded piles. Geotechnical Engineering Congress, II, pp.1307-13-9.

6.Wakai A., Gose S. and Ugai K. (1999). 3-D elasto-plastic finite element analysise of pile foundations subjected to lateral loadings. Soils and Foundations, 39, .97-11.

7.Mezazigh S. (1995). Etude expérimentale de pieux chargés latéralement : proximité d'un talus et effet de groupe. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes.

NOTATIONS

B: diamètre du pieu (m);
L_p: longueur du pieu;
FH: effort latéral (kN);
z: profondeur dans le sol (m)
y(z): déplacement latéral à la profondeur z;
y: déplacement latéral (mm).