



Behavior of a pile group (3.3) subjected to lateral loading

L.H. Chekroun¹, N. Boumechra², A. Djedid³

¹ Département de Génie Civil, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie.

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

³ Département d'Architecture, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie.

*Corresponding Author. E-mail: Chekroun_gc@yahoo.fr; Tel: (+213 5 55 06 82 26)

Abstract

The behavior of deep foundations consisting of a pile group is complex because it is influenced by a large number of parameters such as soil, pile, pile-soil contact, group effect and footing. This work contributes to understanding and analysis of soil-structure interaction of a pile foundation using a three-dimensional computer code Plaxis 3D, based on the finite element method. It consists in a numerical model of pile-soil system subjected to static loads. The study includes a validation of the Plaxis 3D model comparing to Chores analytical model, the varying effect of distance between piles, and the effect of the piles diameter on the response of soil-pile system subjected to an horizontal static load. It revealed that the distribution of bending moments is dependent on the spacing between piles. On the spacing of 2d to 4d, the piles worked in group but they work also differently. It shows that the increase of piles diameter allows both an increase the stiffening and a decrease the horizontal displacements but not systematically induces a decrease of the internal forces.

Keywords: Interaction, Soil, Structure, Group of piles, Lateral load, FEM, Plaxis 3D

Comportement d'un groupe de pieux (3×3) soumis à un chargement latéral

Résumé

Le comportement des fondations profondes composées d'un groupe de pieux est assez complexe vu le nombre de paramètres qui le conditionnent tel que le sol, le pieu, le contact, l'effet de groupe et l'effet de la semelle. Le présent travail contribue à la compréhension et à l'analyse de l'interaction sol-structure d'une fondation sur pieux en utilisant le code de calcul tridimensionnel Plaxis 3D, basé sur la méthode des éléments finis. Il consiste à mettre un modèle numérique du système Sol-Pieu soumis à un chargement statique. L'étude comporte une validation du modèle Plaxis 3D par rapport au modèle analytique de Chores, l'effet de la variation de l'entraxe entre pieux, et l'effet de la variation du diamètre des pieux sur la réponse du système sol-pieu soumis à un chargement horizontal en interaction statique. Cette étude a révélé que la distribution des moments fléchissant est tributaire de l'espacement entre pieux. D'un entraxe de 2d à 4d, les pieux travaillent en groupe mais aussi ils travaillent différemment. Cette étude a montré aussi que l'augmentation du diamètre des pieux permet à la fois une rigidification des pieux et une diminution des déplacements horizontaux mais n'induit pas systématiquement une diminution des efforts internes.

Mots-clés : Interaction, Sol, Structure, Groupe de pieux, Chargement latéral, MEF, Plaxis 3D

1. Introduction

Les ouvrages du génie civil sont souvent réalisés sur des sols de différentes qualités. Lorsque la qualité du sol est médiocre, on opte pour des fondations profondes pour accéder aux couches du sol offrant une meilleure portance. Parmi ces fondations profondes, les fondations sur pieux qui constituent une solution souvent préconisée en construction [7, 8]. Pour résister à des chargements horizontaux, on est parfois contraint à ajouter des pieux inclinés. Aujourd'hui, les pieux verticaux sont conçus pour reprendre aussi les sollicitations latérales. Ces dernières peuvent être de type quasi-statique (choc d'accostage d'un navire, freinage brusque d'un convoi sur un pont,...) ou dynamique (houle, effet du vent sur les structures, séisme).

En effet, les fondations sont constituées de plusieurs pieux plus au moins espacés, et qui sous chargement latéral, mobilisent la résistance du sol. Des interactions sol-pieu ont donc lieu, et sont d'autant plus importantes que lorsque l'espacement entre pieux est faible. Ces interactions réduisent la capacité du groupe à résister aux charges latérales conduisant à un effet de groupe [9].

2. Validation du modèle de groupe de pieux

Afin de valider le modèle du comportement de groupe de pieux, on a choisi le modèle analytique proposé par Chore et al. [3].

2.1. Principes de la méthode

Les principales hypothèses du modèle proposé par Chore et al. [3] sont comme suit:

- Le pieu est modélisé en éléments finis poutre unidimensionnelle reposant sur des appuis élastiques longitudinaux. Chaque nœud a 6 degrés de liberté et la matrice de rigidité élémentaire $[K]_e$ est définie comme suit, figure 1 :

$$[K]_e = \int_0^L [B]^T [D][B] dz \quad (1)$$

Où :

- $[B]$: la matrice contrainte-déformation
- $[D]$: la matrice qui constitue l'élément poutre.
- L : la longueur de l'élément poutre.

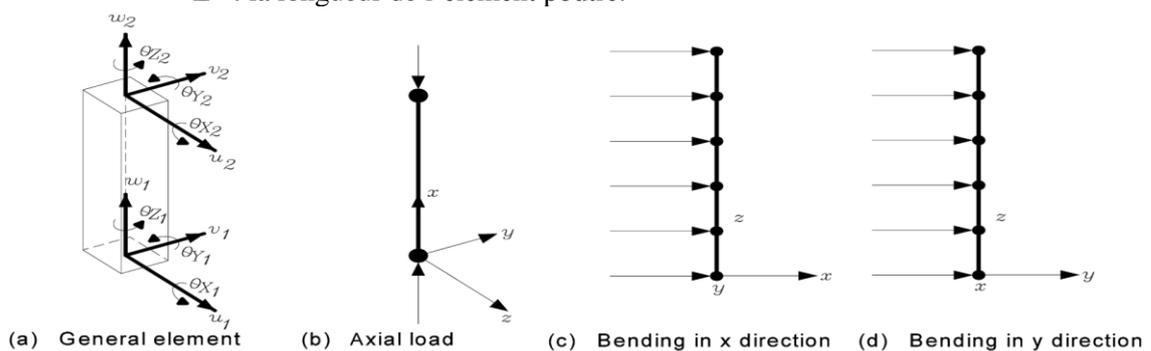


Figure 1 : Représentation de l'élément poutre selon Desai et al. [4]

- Le sol est représenté par une série de ressorts linéaires qui ne sont pas couplés dans les trois directions X, Y, Z. La réaction du sol $\{p_x, p_y, p_z\}$ dans n'importe quel point est décrite par la relation suivante :

$$\begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{sx} & 0 & 0 \\ 0 & E_{sy} & 0 \\ 0 & 0 & E_{sz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Où :

p_x, p_y, p_z : la réaction du sol dans les trois directions X, Y, Z,

E_{sx}, E_{sy}, E_{sz} : sont les modules de réaction du sol dans les trois directions X, Y, Z.

- Le comportement du sol est de type non linéaire, et la relation chargement-déplacement développée est caractérisée par la relation suivante :

$$\frac{dp}{dy} = \frac{k(1 - \frac{p}{p_u})}{1 + \frac{ky}{p_u}} \quad (3)$$

Où :

p_u : la réaction ultime du sol à la profondeur z exprimée en kN/m.

2.2. Définition du modèle de validation

Le modèle consiste à étudier le comportement d'un groupe de deux pieux en série G2PS munis d'une semelle de liaison, et celui de trois pieux en série G3PS munis d'une semelle de liaison.

Les 2 pieux ayant une longueur $L=3$ m et un diamètre $d=0,30$ m, sont en béton armé avec les propriétés élastiques suivantes : le module de Young $E_p=0,3605 \times 10^8$ kPa, le coefficient de Poisson $\nu_p=0,15$, et le poids volumique $\gamma_p=40$ kN/m³.

L'espace en pieux est pris égal à trois fois le diamètre, et est constant. La semelle de liaison a les dimensions suivantes : 1,50m/0,60m/0,60m pour le cas du groupe G2PS et 2,40m/0,60 m/0,60m pour le cas du groupe G3PS. Elle est en béton ayant les mêmes propriétés élastiques que le pieu (Figures 2 et 3).

Le sol est défini par les caractéristiques suivantes : $E_s=4267$ kN/m², $\gamma_s=17,2$ kN/m³, une cohésion $c=28$ Kpa et un angle de frottement interne $\phi=38^\circ$. Pour le cas du modèle Plaxis, il obéit à une loi de comportement élastique parfaitement plastique de type Mohr-Coulomb [6].



Figure 2 : Représentation du groupe de pieux G2PS et G3PS par le modèle de Chore [3]



Figure 3 : Représentation du groupe de pieux G2PS et G3PS par le Plaxis 3D

2.3. Discussions des résultats :

Pour le cas du modèle G2PS (Figure 4a) :

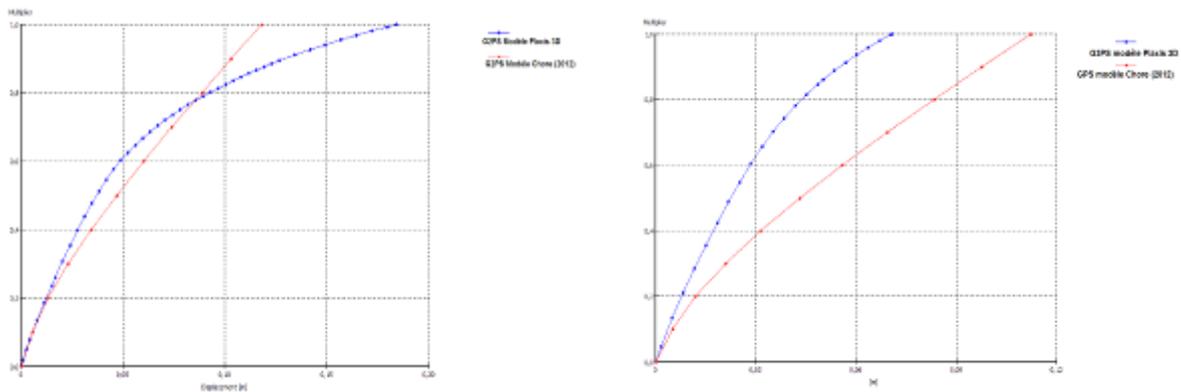
- Lorsque le chargement atteint sa valeur maximale c.à.d. 100 %, les déplacements latéraux sont de l'ordre de 0,184 m sur le modèle Plaxis, et seulement 0,118 m pour le modèle de Chore, ce qui représente une différence de 35 % ;
- La prise en compte des non linéarités du sol dans la formule 3 proposée par le modèle Chore n'est pas très représentative, contrairement au modèle Plaxis qui décrit mieux les sols dans la phase de plasticité.

Pour le cas du modèle G2PS (Figure 4b) :

- Lorsque le chargement atteint sa valeur maximale c.à.d. 100 %, les déplacements latéraux sont de l'ordre de 0,071 m sur le modèle Plaxis, et seulement 0,112 m pour le modèle de Chore, ce qui représente une différence de 36 % ;
- L'ajout du 3ème pieu dans le modèle Plaxis, a sensiblement diminué le déplacement latéral puisque le déplacement était de 0.184 m pour le groupe G2PS et atteignant seulement 0.071m (soit -61%) pour le groupe G3PS. Cette observation n'est pas valable pour le modèle Chore (soit -5.1%).

Cette étude comparative entre un modèle analytique simplifié et celui en éléments finis de Plaxis montre l'importance de la phase plastique traitée par la loi de comportement Mohr-Coulomb utilisée par le code de calcul Plaxis 3D. Le modèle de Chore repose sur une modélisation du pieu comme une poutre

unidimensionnelle et la prise en compte des non linéarités des sols uniquement par la diminution de la rigidité. La déformation des pieux est ainsi sous-évaluée [2].



(a) G2PS

(b) G3PS

Figure 4 : L'évolution du déplacement horizontal en fonction du chargement pour les deux modèles G2PS et G3PS

3. Influence de la variation de l'espace entre pieux

3.1. Définition du modèle

Afin de voir l'influence de l'espace entre les pieux sur les déplacements horizontaux de la semelle de liaison et les moments fléchissant sur les pieux, quatre (04) cas de groupes de (3x3) pieux seront traités dont l'espace diffère comme suit : 2d, 3d, 4d et 6d, avec d : le diamètre du pieu.

Le système sol-pieux est discrétisé à l'aide des options du maillage automatique du logiciel Plaxis [1] en 1030 éléments avec chaque élément possède 15 nœuds, soit un total de 4612 nœuds. Les déplacements aux frontières du maillage sont imposés nuls (Figure 5).

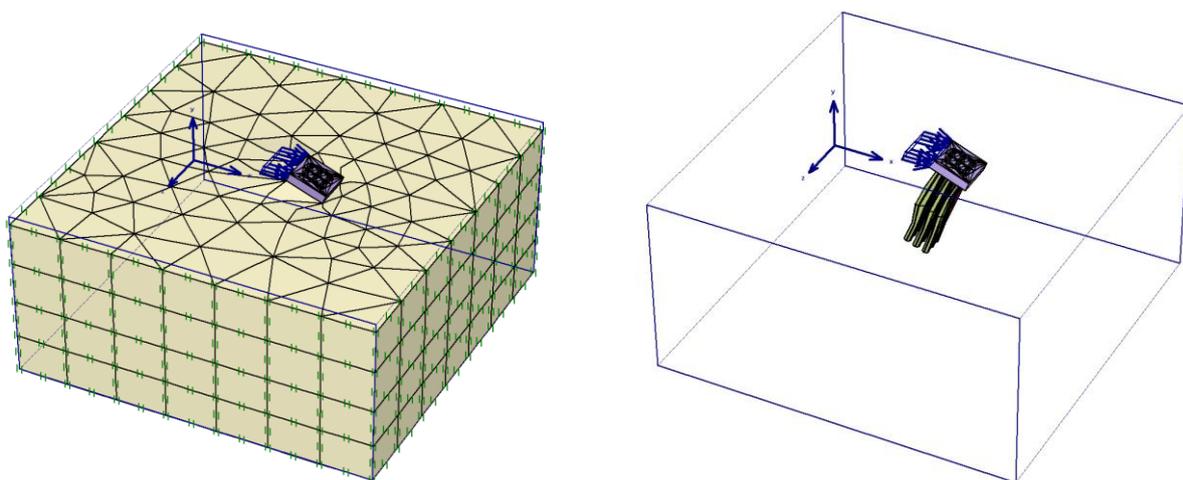


Figure 5 : Discrétisation et représentation du système du groupe de pieux (3x3) par le code de calcul Plaxis.

Le modèle du groupe de pieux (3x3) a été modélisé en 3D. La zone du modèle du massif s'étend latéralement sur 40m. Sa profondeur est de 20m, ce qui représente 2 fois la longueur du pieu. En ce qui concerne les conditions aux limites, les déplacements verticaux et horizontaux aux frontières du modèle sont supposés nuls. Le système sol-pieux est discrétisé à l'aide des options de maillage tridimensionnel du logiciel. Chaque élément fini possède 15 nœuds avec 3 degrés de liberté. Le chargement latéral statique est de 1000 kN/m² appliqué par incrément sur le côté de la semelle. Cette dernière a les dimensions de 8,00m/8,00m/2,00m. Le pieu a une longueur égale à 10m et un diamètre de 0,50 m, modélisé par la loi de comportement linéaire élastique type

Hooke. Le sol est modélisé par la loi de comportement élastoplastique du type Mohr-Coulomb. Les caractéristiques physiques et mécaniques du pieu et du sol [5] ainsi que celles de la semelle de liaison, sont récapitulées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés physiques et mécaniques du modèle de référence.

Type	γ_d [kN/m ³]	γ_s [kN/m ³]	E [kN/m ³]	ν	C [Kpa]	φ [°]	ψ [°]
Pieu	25	-	$2 \cdot 10^9$	0.30	-	-	-
Semelle	25	-	$2 \cdot 10^9$	0.30	-	-	-
Argile Compacte	18	20	12820	0,33	15	30	0

3.2. Discussions des résultats

La figure 6a montre la déformation du modèle sous l'effet du chargement horizontal. Nous remarquons aussi que les déformations se localisent plus au moins autour de la semelle de liaison, et diminuent en s'éloignant de la semelle. La figure 6b montre l'évolution du déplacement horizontal sur le long des pieux. Nous constatons que les déplacements sont très importants en tête des pieux, puis diminuent en profondeur.

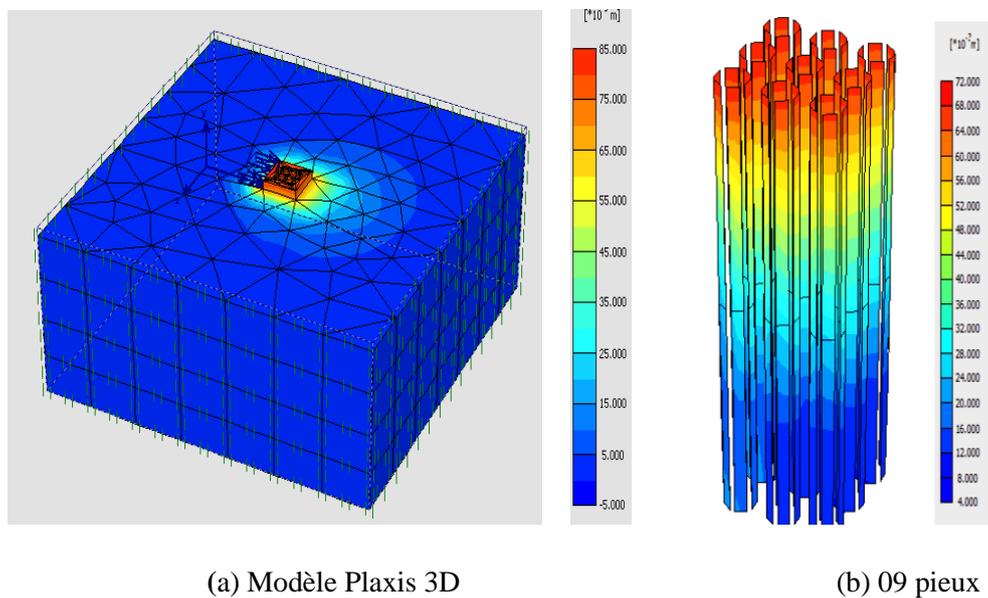


Figure 6 : La distribution des déplacements horizontaux.

La figure 7 représente les déplacements horizontaux des points A, B, C, D qui se situent au niveau du centre de gravité CDG (fibre supérieure) de la semelle de liaison, pour les différents espacements entre pieux. Nous pouvons en tirer les remarques suivantes :

- Le déplacement maximal a été enregistré pour le cas d'un entraxe de deux $2d$, et son amplitude est de $0,078m$.
- L'augmentation de l'espacement entre pieux sous l'effet du même chargement induit une diminution des déplacements horizontaux de la semelle. Cette diminution est de l'ordre de $6,41\%$ en passant d'un

entraxe de 2d à 3d, et de 9 % de 2d à 4d, et enfin une diminution de 11,53 % pour le passage d'un entraxe de 2d à 6d.

- La diminution des déplacements horizontaux peut être expliquée par la superposition et le chevauchement des contraintes dans le sol. En fonction de l'espacement des pieux, la zone de superposition des contraintes et des déformations est plus importante lorsque les pieux sont très peu espacés. Quand l'espacement augmente, la superposition n'est pas très significative ; ce qui se traduit par une diminution des contraintes et des déformations.

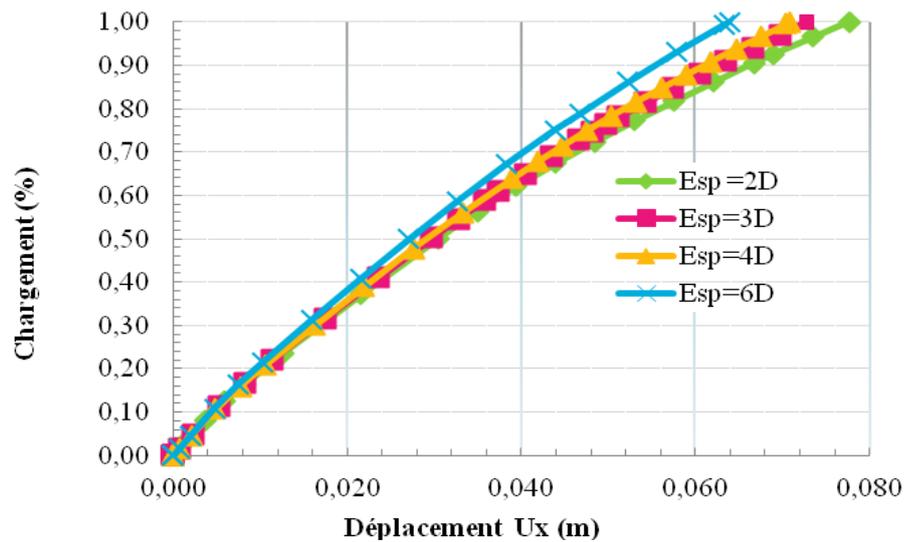


Figure 7: L'évolution des déplacements horizontaux U_x au niveau de la semelle de liaison.

La figure 8 représente les neuf pieux du groupe. Ils sont numérotés de 1 à 9 pour faciliter les commentaires et les explications apportées dans l'étude des efforts internes dans les pieux. On note aussi que :

- Les pieux N°3, N°6, N°9 : sont des pieux de la rangée avant
- Les pieux N°2, N°5, N°8 : sont des pieux de la rangée intermédiaire
- Les pieux N°1, N°4, N°7 : sont des pieux de la rangée arrière

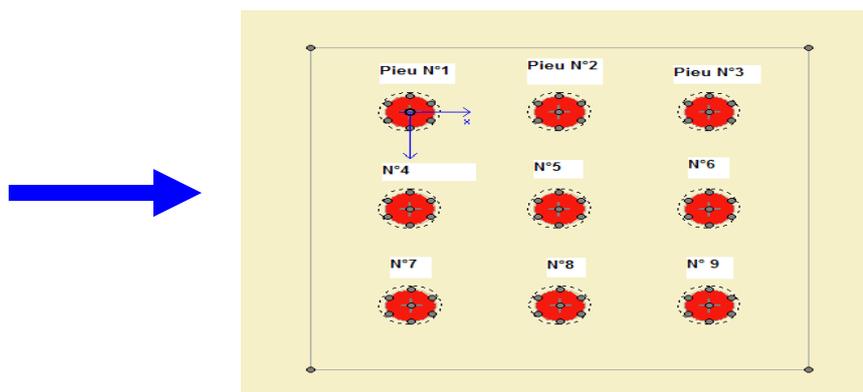


Figure 8: Représentation et numérotation des pieux du groupe 3×3.

La figure 9 illustre la distribution des moments fléchissant pour les pieux N°4, N°5, N°6. A partir de cette figure, nous constatons que :

- Les moments fléchissant au niveau des trois (03) pieux sont proportionnels à l'augmentation des entraxes des pieux ;

- D'un entraxe de 2.d à 4.d ; le moment max est situé à mi-hauteur des pieux c.à.d. à 5m. On remarque aussi que le moment est maximal au niveau du pieu N°6 relatif à la rangée d'avant par rapport aux pieux N°4 et N°5 relatifs respectivement aux rangées d'arrière et la rangée intermédiaire. Ce phénomène est appelé « Effet du Groupe » sous l'effet de la superposition des contraintes et des déformations. Ce phénomène est observé lorsque les pieux sont peu espacés ;
- Avec un entraxe de 6.d, les moments fléchissant commencent à s'équilibrer du fait de la régression de l'effet d'ombre et aussi du non superposition des contraintes et des déformations, et les pieux ont tendance à se comporter comme des pieux isolés.

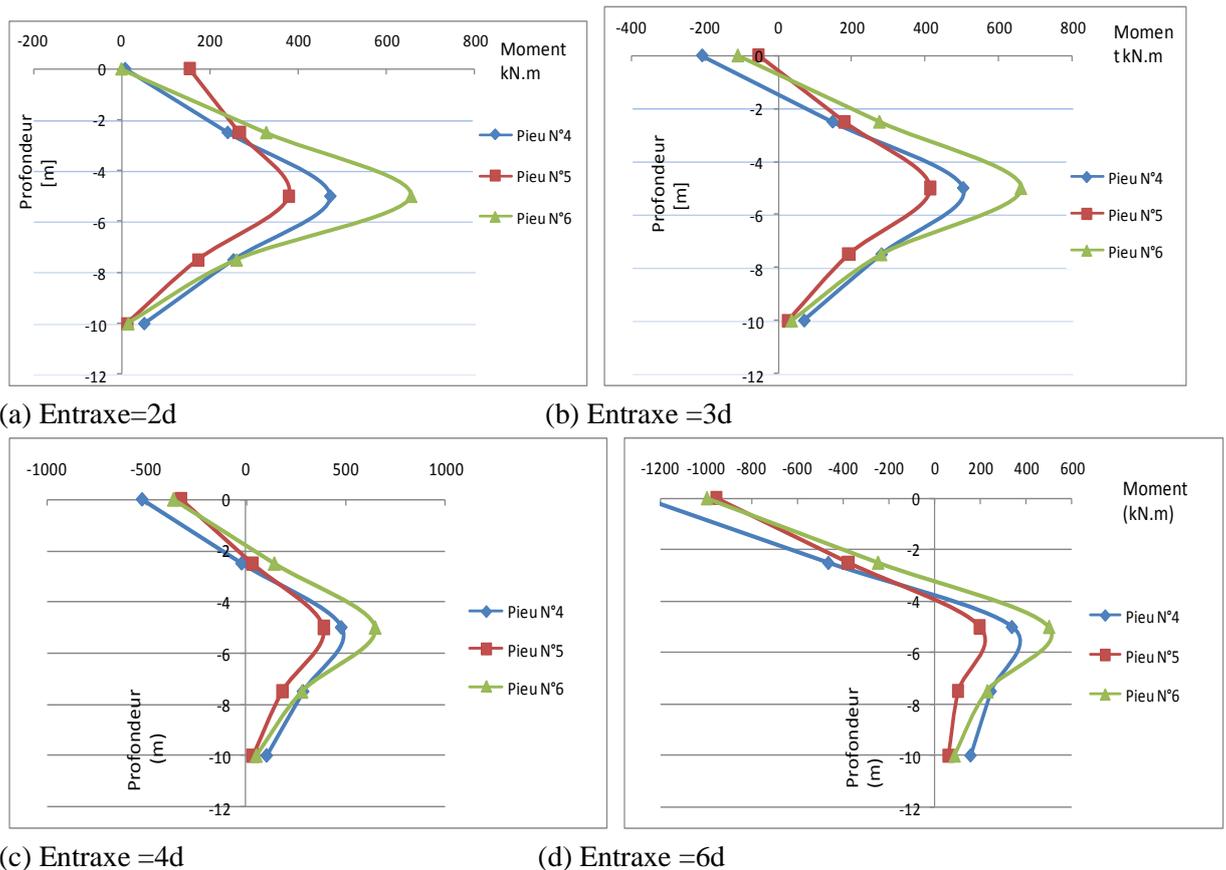


Figure 9: Distribution des moments fléchissant sur le long des pieux.

4. Influence de la variation du diamètre des pieux

4.1. Définition du modèle

Afin de connaître l'influence de la variation du diamètre du pieu, nous avons effectués cinq simulations numériques en prenant cinq différentes valeurs de diamètre allant de 0,50m à 0,90m. Le modèle de référence cité dans le tableau 1, a été repris en variant uniquement le diamètre des pieux. L'entraxe est maintenu fixe et pris égal à 3,00m soit 6.d.

4.2. Résultats

La figure 10 illustre les déplacements horizontaux des points A, B, C, D qui se situent au niveau du centre de gravité de la semelle de liaison, pour les différents diamètres des pieux.

L'augmentation du diamètre des pieux induit une diminution des déplacements horizontaux, et le système du groupe de pieux gagne en rigidité, et cela se répercute sur les déplacements. Le déplacement maximal qui est de l'ordre de 0,069 m, a été enregistré pour le cas du plus petit diamètre c.à.d. $d=0,50m$. L'augmentation du diamètre sous l'effet du même chargement induit une diminution des déplacements horizontaux de la semelle. Cette diminution est de l'ordre de 10,14 % en passant d'un diamètre 0,50m à 0,80m.

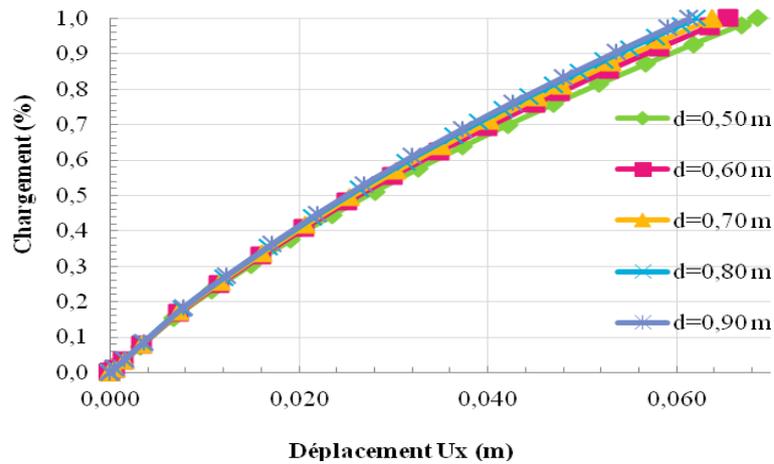


Figure 10: L'évolution des déplacements horizontaux U_x au niveau de la semelle de liaison.

La figure 11 représente la distribution des moments fléchissant sur le long des pieux N°4, N°5 et N°6, pour les différents diamètres des pieux. A travers cette figure, nous remarquons :

- Quand le diamètre des pieux est de $d=0,50$ m et un entraxe de 3 m c.à.d. $6d$; l'effet d'ombre n'est pas significatif et les moments fléchissant sont distribués d'une manière quasi identique, malgré ça le pieu N°4 de la rangée arrière est relativement plus sollicité ;
- A partir de $d=0,60$ m, nous remarquons que les moments deviennent plus importants sur le pieu N°6 de la rangée d'avant par rapport aux moments sur les pieux N°4 et N°5. Ceci est dû à la diminution de l'espacement entre pieux sous l'effet de l'augmentation du diamètre du pieu ;
- A travers les résultats trouvés, on remarque que l'entraxe de $6d$ est l'entraxe à partir duquel on observe le phénomène de « Effet du Groupe ».

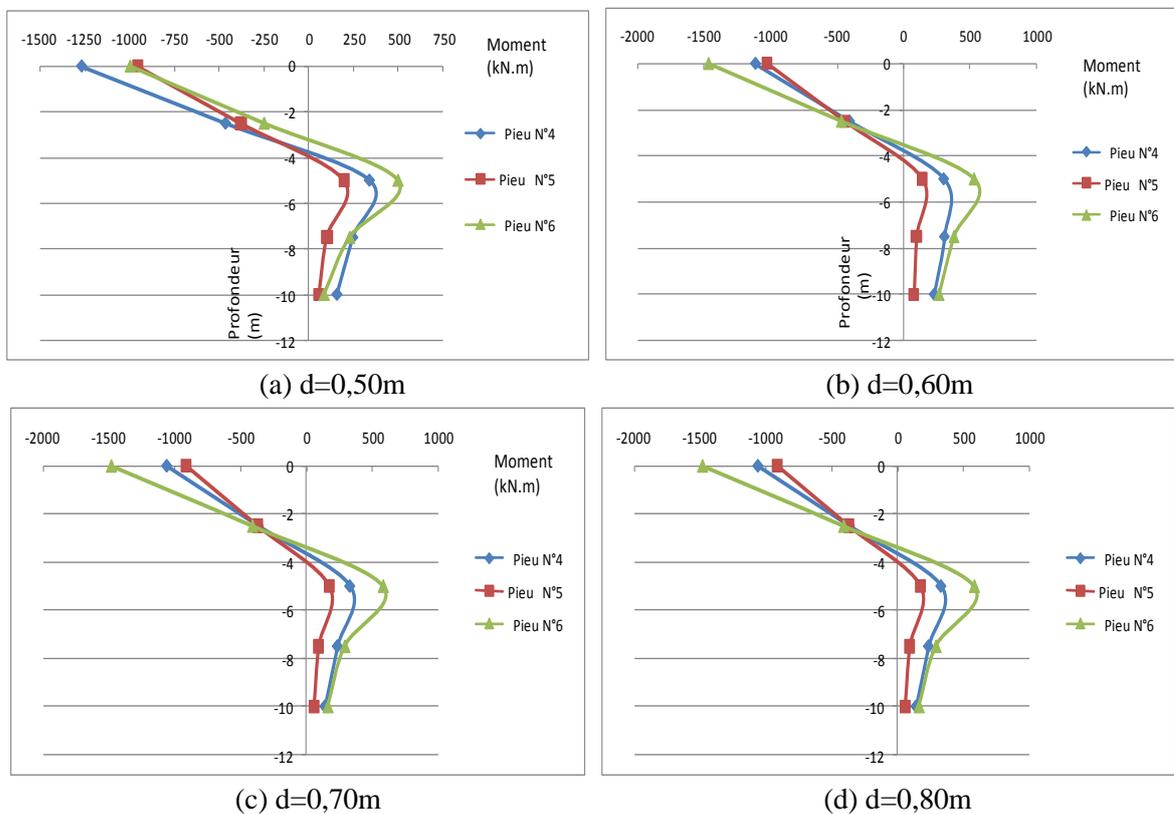


Figure 11: Distribution des moments fléchissant sur le long des pieux.

Conclusion

Le comportement d'un pieu dans un groupe est fort complexe, et est très différent du comportement du pieu isolé. Lorsque le pieu est soumis à un chargement transmis par la semelle de liaison, sa résistance vis-à-vis du chargement entraîne une mobilisation de la réaction du sol qui enserre le pieu, ce qui en résulte une superposition des contraintes et des déformations dans le sol. La zone de superposition des contraintes et des déformations est tributaire de l'espacement entre pieux. Elle est plus grande quand les pieux sont très peu espacés, et est plus petite quand l'espacement entre les pieux est suffisamment important. De ce fait, le choix de l'espacement entre les pieux dans un ouvrage reste une étape cruciale dans le dimensionnement du groupe de pieux.

L'augmentation du diamètre des pieux induit un accroissement de la rigidité, mais n'induit pas forcément une diminution des efforts internes. L'effet d'ombre observé dans ces simulations doit impérativement être pris en compte dans le dimensionnement du groupe de pieux sous l'effet d'un chargement horizontal.

Références

1. Brinkgreve, R.B.J, Broere.W., *PLAXIS 3D FOUNDATION tutorial, Netherlands manual Plaxis 3D.* (2005).
2. Chekroun L.H., *Thèse de magister en Génie civil Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, Algérie* (2013).
3. Chore H.S.; Ingle R.K.; Sawant V.A., *Interaction and Multiscale Mechanics* 5 (2012) 57-73.
4. Desai, C.S., Kuppusamy, T. and Alameddine, A.R., *J. Struct .Eng.-ASCE* 107 (1981) 817-834.
5. Hartwingsen G., *Etude et modélisation du renforcement de sol par Colonnes à Module Mixte (CMM)». Insa Strasbourg* (2012).
6. Antti LARKELA., *Modeling of a pile group under static lateral loading, Master's thesis ,Helsinki university of technology* (2008).
7. Zamri H. Chik ., *Lateral Behavior of Single Pile in Cohesionless Soil Subjected to Both Vertical and Horizontal Loads,Department of Civil and Structural Engineering,University of Kebangsaan Malaysia, European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.29 No.2 (2009), pp.194-205 (2009).*
8. Salini U., *Lateral Load Capacity of Model Piles on cohesionless soil , EGJE Vol. 14 (2009).*
9. Nima G. Z., *Performance of Single Pile under Vertical and Lateral Load in Sand, Clay and Layered Soil , EGJE Vol. 16 (2011).*

(2015) ; <http://www.jmaterenvironsci.com>