Modélisation numérique en 3D de groupe de pieux et de fondation mixte radier–pieux dans l'argile molle

Ngoc – Thanh NGUYEN, Pierre FORAY, Etienne FLAVIGNY.

Laboratoire Sols – Solides – Structures. UMR5521, INPG, UJF. BP53, 38041 Grenoble, cedex 9

tnguyen@geo.hmg.inpg.fr

RÉSUMÉ. *Cet article présente une comparaison des modélisations numériques du comportement de groupes de pieux longs, et des fondations mixtes radier - pieux dans les sols cohérents très mous dont la résistance et le module de déformation sont très faibles et augmentent linéairement avec la profondeur. De là, on cherche à préciser comment le concept de fondation mixte radier – pieux peut apporter des solutions aux ouvrages dans ces sols. En utilisant le logiciel éléments finis Plaxis, on abordera ici l'aspect de simulation numérique et ensuite comparera les résultats obtenus en 2D et en 3D. A l'aide de Plaxis 3D Foundation, on a pu analyser l'interaction sol/structure et sol/pieux. On a en particulier abordé les problèmes suivants:*

- l'analyse précise de la manière dont se mobilise l'effet de groupe des pieux au niveau du frottement latéral et de la résistance de pointe pour des pieux installés dans l'argile molle.

- l'analyse des mécanismes d'interaction radier - pieux dans le cas d'une fondation mixte

ABSTRACT. *This article presents a comparison of different numerical models of the bearing of long pile groups and piled raft foundations in very soft soils, for which the very low resistance and low elastic modulus increase linearly with the depth. This comparison is carried out in order to study the concept of pile raft foundations as pertinent solution for constructions on soft soil. The use of finite element software packages for the dimensioning of deep foundations is very effective and is becoming more frequent. In this paper, the software package Plaxis is used for this purpose, and results in 2D and 3D are compared. Using Plaxis 3D Foundation, it was possible to analyse soil – structure and soil – pile interaction. In particular, the following problems were addressed:*

- a precise analysis of the influence of different pile group configurations on the mobilisation of side friction and point resistance for piles installed in soft clay.

- an analysis of the mechanisms of piled- raft interaction in the case of piled raft foundation.

MOTS-CLÉS : *fondation mixte, frottement latéral, argile molle.*

KEYWORDS: *piled raft foundation, side friction, soft clay.*

1. Introduction

Actuellement, la construction des ouvrages sur les sols mous est un problème majeur. Cela conduit à rechercher des solutions de fondations adaptées à ce type de terrains. Les recherches récentes s'orientent vers les fondations mixtes radier-pieux et/ ou le renforcement du sol par inclusions rigides ou colonnes ballastées.

Les fondations profondes en groupe ou sous forme de fondation mixte radier-pieux dans les argiles ont été étudiées par un grand nombre d'auteurs, que ce soit du point de vue de la modélisation numérique (Poulos 2001, Borel 2001) ou par le calcul analytique (Poulos 1980, Combarieu 1988, Randolph 1994) ou par des essais en centrifugeuse (Horikoshi et Randolph 1999) ou encore par des mesures sur des structures instrumentées (Viggiani 1998). Le problème de l'interaction sol/ pieu/radier et ses conséquences sur le tassement du radier sont cruciaux pour une fondation mixte dans l'argile molle. La présente étude montre qu'il est indispensable d'effectuer une modélisation tridimensionnelle du problème pour simuler correctement les interactions entre les pieux et le radier.

La simulation numérique est effectuée ici en utilisant le logiciel Plaxis qui est un des logiciels utilisés classiquement dans la modélisation des problèmes en géotechnique. La version Plaxis 3D Foundation permet l'analyse en 3D des fondations superficielles, mixtes et offshore, avec prise en compte notamment de couches de sol d'épaisseur variable, des interactions sol/radier/pieu, et du phasage de construction. On présente une comparaison des modélisations numériques du comportement de groupes de pieux longs, et de fondations mixtes radier - pieux dans les sols cohérents très mous soumis à une charge axiale uniforme. On a commencé par confronter le modèle 3D au modèle 2D axisymétrique dans le cas du chargement d'un pieu isolé, ce qui a nécessité une étude précise du maillage en 3D. Une fois résolus ces problèmes de maillage, on a traité ensuite le cas de groupes et de fondations mixtes utilisant n*n pieux, en précisant les mécanismes de transfert de charge dans chacun des cas.

2. Pieu isolé

On a modélisé d'abord un pieu isolé de 1m de diamètre et de longueur variable (L/D =20, 30 et 40) dans un sol dont le module d'Young E augmente linéairement avec la profondeur. L'épaisseur de la couche de sol est deux fois la longueur du pieu. Le rapport des rigidités entre le pieu et le sol (K = Ep/ Es) est pris constant égal à 1000. Pour obtenir un accord entre les résultats des calculs 2D axisymétrique et 3D, il a fallu apporter une attention particulière au maillage en 3D. Il faut affiner les maillages dans le domaine proche de la fondation, surtout dans la direction verticale. La taille d'un élément vertical ne doit pas être supérieure à celle du diamètre du pieu. Ce calage une fois effectué, on constate un bon accord entre les résultats du calcul 3D et ceux proposés par Poulos (1980) et Randolph (1994).

3. Fondation mixte radier – pieux et groupe de pieux.

A l'aide de Plaxis 2D, on peut simuler et étudier un pieu isolé en axisymétrie dans sols mous en utilisant le modèle spécifique « soft soil ». Par extension, on peut être tenté, comme le font beaucoup de praticiens, de modéliser un groupe de pieux et une fondation mixte avec un modèle 2D en déformation plane. Les simulations que nous avons pu effectuer dans ce cas (Nguyen. 2003) montrent clairement que le modèle 2D accentue l'effet d'enserrement du sol entre les pieux en entraînant un frottement négatif sur une partie très importante de la longueur des pieux (le sol est solidaire des pieux et se déplace en bloc). Les résultats obtenus, et leur comparaison ultérieure avec la modélisation 3D, montrent qu'il n'est pas raisonnable d'étudier l'effet de groupe et l'effet de radier par une modélisation 2D. C'est pourquoi on doit simuler notre problème en conditions tridimensionnelles.

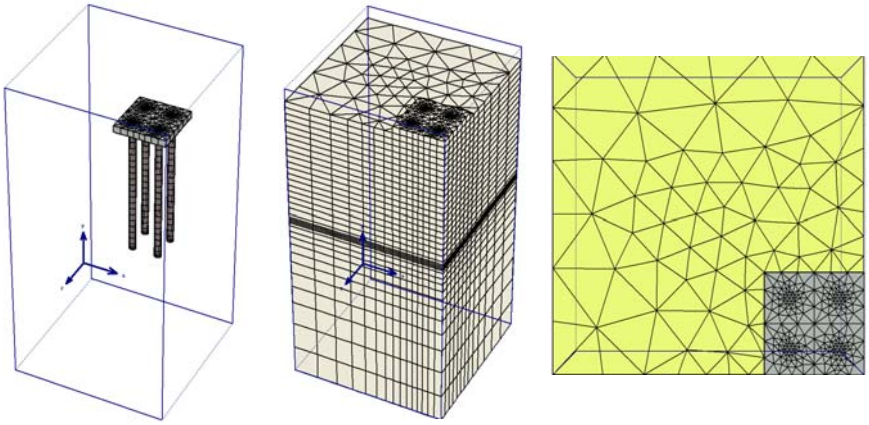

Fig. 1. *Modélisation d'un quart d'une fondation mixte (4*4 pieux) dans Plaxis3DF.*

3.1. *Modélisation d'un groupe et d'une fondation mixte en 3D*

On a comparé à l'aide de Plaxis 3D Foundation le comportement d'un groupe de pieux avec celui d'une fondation mixte dans une argile molle. On a choisi dans un premier temps d'effectuer un calcul à court terme en utilisant pour cela un modèle Mohr Coulomb, avec un module d'Young et une cohésion augmentant linéairement avec la profondeur. Les paramètres que nous avons utilisés sont très proches de ceux des sédiments très mous des grands fonds marins, comme ceux que l'en peut trouver sur le site de DALIA en Angola, sous une profondeur d'eau de 1200 m, dans une zone d'activité pétrolière. Les paramètres de ce sol sont: cohésion non drainée c_u (kPa) = 20 + 2*z (z : profondeur à mètres), module d'Young non drainé : E_u = 150* c_u (kPa), coefficient de Poisson de 0,495. On a cherché à introduire des conditions d'interface sol/pieu proches des recommandations habituelles: $\tau = \alpha * c_u$

où α est fonction de la profondeur selon la réglementation API. (American Petroleum Institute)

L'utilisation des symétries (Figure 1) nous a permis de modéliser des groupes de 4*4 pieux et des fondations mixtes avec un diamètre de pieu de 1m et une longueur de 20m. On a étudié l'entraxe des pieux suivant : 2,5 d, 3d, 4d et 5d pour estimer l'effet d'interaction et l'effet du radier. L'épaisseur de radier est supposée constante égale à 1m. Largeur B_s du radier pour des fondations mixtes est constante aussi égale à 16m. Les pieux et le radier sont supposés élastiques linéaires avec un module d'Young de 30 GPa et un coefficient de Poisson de 0,2.

3.2. *Capacité portante du groupe.*

Le coefficient d'efficacité concernant la capacité portante du groupe (Cg) est le rapport de la capacité portante ultime du groupe et de la capacité portante du pieu isolé multipliée par le nombre total de pieux dans le groupe. Cette valeur est souvent prise en pratique égale à 1 pour un entraxe de 8 diamètres et à 0,7 pour un entraxe de 3 diamètres. (Frank, 1999)

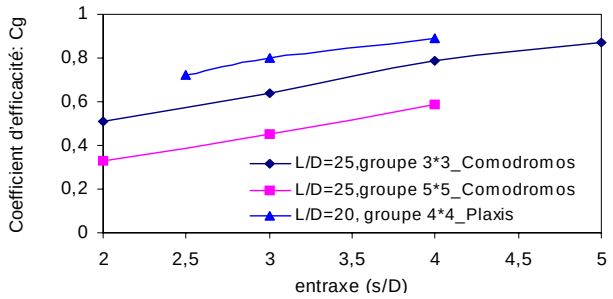

Figure.2. *Coefficient d'efficacité de la capacité portance du groupe.*

On a adopté comme critère de capacité portante la charge appliquée correspondant à un tassement de 0,1.D (soit 10cm dans notre cas, ce qui correspond effectivement à une valeur "limite" pour la structure). La figure 2 nous montre la comparaison des résultats de la modélisation Plaxis3DF avec ceux proposés par Comodromos (2005) dans deux cas de groupes dans l'argile molle (c_u = 25 kPa).

3.3. *Modélisation du frottement le long du pieu central.*

L'étude des mobilisations du frottement le long du pieu central (noté 1) sur 3 niveaux différents, entre 2-3 m, 10-11m et 17-18 m est particulièrement intéressante. Les figures 3a) et b) représentent la comparaison des différentes

fondations aux deux premiers niveaux. Pour le cas d'une fondation mixte, on a toujours des frottements légèrement négatifs dans le domaine entre 2-3m quelque soient les entraxes. Par contre, dans les groupes de pieux, on mobilise bien des frottements positifs, mais moins importants que ceux du pieu isolé. A la profondeur de 10-11 m, le frottement du pieu dans la fondation mixte à ce niveau est très faible par rapport à celui d'un pieu isolé. Au niveau 17-18 m, les mobilisations du frottement se rapprochent de celles d'un pieu isolé. A tous les niveaux, l'effet de l'entraxe nous montre très bien une mobilisation du frottement le long du pieu maximale pour un entraxe de 5d et décroissante lorsque l'entraxe se resserre.

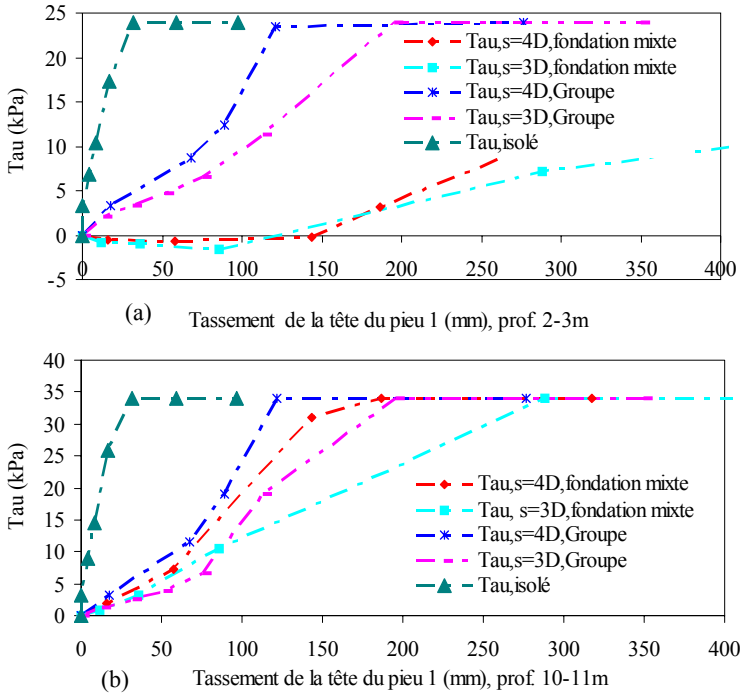

Figure 3. *Mobilisation du frottement le long du pieu 1: a) à 2-3m et b) à 10-11m*

Concernant le cas d'une fondation mixte, on vérifie que les mobilisations du frottement le long du pieu pour le pieu 2 et le pieu 4 sont les mêmes. Le pieu 3 situé au coin du groupe, mobilise le frottement le plus fort, pratiquement égal à celui du pieu isolé. Par contre le pieu 1 (au centre) mobilise le frottement le plus faible du groupe. La figure 4 nous montre que le resserrement des pieux dans la fondation mixte a un effet défavorable. On note aussi la distribution non uniforme des contraintes de frottement à un niveau donné autour du pieu à faible profondeur. On a pu voir qu'avec une rigidité très grande du radier, les frottements mobilisés le long des pieux dans un groupe sont supérieurs à ceux des pieux dans la fondation mixte.

On a trouvé des frottements négatifs sur une longueur de pieu supérieure à 5m sous le radier de la fondation mixte.

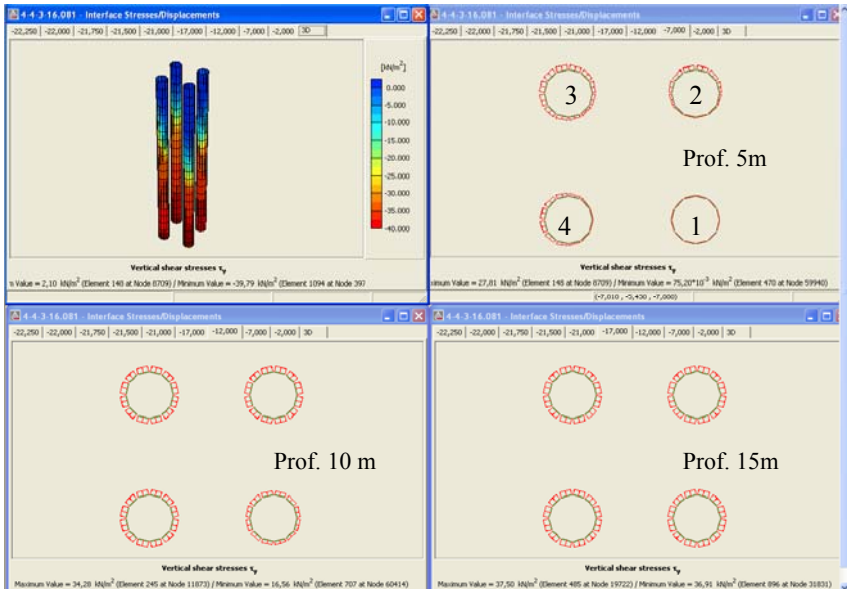

Figure 4. *Mobilisation du frottement le long de chacun pieu à différentes profondeurs (fondation mixte, entraxe = 3D).*

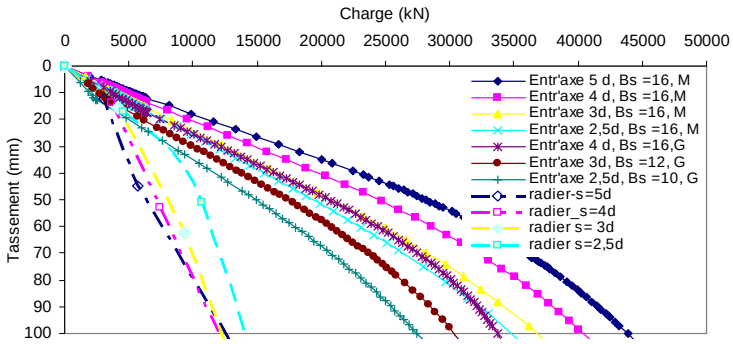

Figure 5. *Courbes de la charge totale et la charge reprise par radier – tassement*

3.4. *L'effet du radier sur la réponse charge – tassement.*

L'analyse de l'effet du radier sur les courbes charge - tassement moyennes est représentée Figure 5, pour différents entraxes de pieu en gardant la même largeur de radier de 16m dans les cas des fondations mixtes. On trouve que la charge reprise par le radier est presque la même dans le domaine des tassements importants,

supérieurs à 100mm. Par contre, dans le domaine élastique, les charges reprises par le radier augmentent lorsque l'entraxe des pieux diminue. On constate que les courbes charge totale - tassement des fondations mixtes sont systématiquement au-dessus de celles des groupes, ce qui signifie que la perte de frottement dans la partie supérieure des pieux est largement compensée par la mobilisation de la charge sous le radier. Celle-ci correspond environ à 30% de la charge totale, alors qu'on a un frottement négatif dans la partie supérieure des pieux. En grandes déformations, on a trouvé que la charge totale de rupture est atteinte rapidement pour les groupes de pieux (saturation du frottement et rupture sous la pointe), par contre une réserve de capacité est obtenue dans les fondations mixtes sous l'effet du radier, avec une capacité plus grande dans le cas d'un entraxe de 5d que dans le cas avec d'un entraxe de 2,5d.

4. Modélisation d'essais en centrifugeuse.

On a testé notre modèle en simulant les expériences effectuées sur une fondation mixte en centrifugeuse par Horikoshi et Randolph (1999), avec des groupes de 9 pieux, 21 pieux et 69 pieux. Les pieux modélisés ont un diamètre de 30cm, une longueur de 15m, et sont en béton. Le radier a un diamètre de 14m et a une épaisseur de 5cm. Les paramètres du sol sont: profil de cohésion: $C_u = 33 + 1{,}2z$ (z: profondeur à mètres) et $G_s = 145\ C_u$. On a pu voir que ces modélisations nécessitent un grand nombre d'éléments pour leur résolution (environ 40000 éléments).

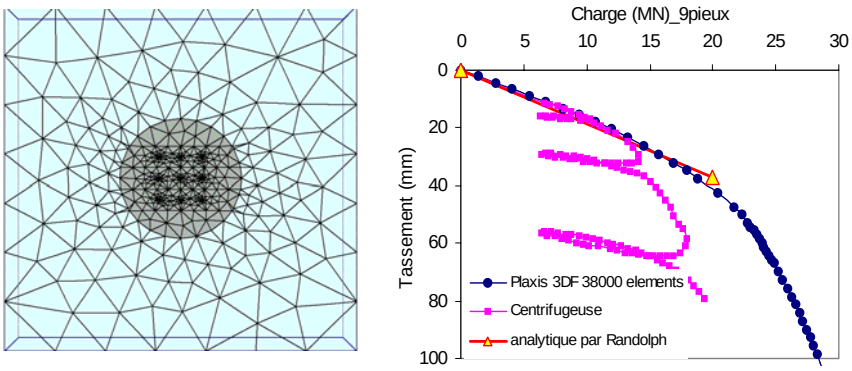

Figure 6. *Modélisation d'une fondation mixte de 9 pieux et ces résultats.*

On montre dans le domaine élastique que les résultats obtenus à partir de Plaxis 3DF sont très proches des résultats mesurés et des prédictions du modèle analytique de Randolph. Par ailleurs, on trouve des différences dans le domaine plastique provenant sans doute d'un calage imparfait des paramètres d'interface, et de l'effet de consolidation aux cycles de charge–décharge effectués dans l'expérience.

5. Conclusion

On a recherché le maillage 3D optimum pour modéliser un pieu isolé de façon à reproduire la modélisation 2D axisymétrique et les résultats de la littérature.

La modélisation des fondations mixtes met clairement en évidence la présence d'un frottement nul ou légèrement négatif dans la partie supérieure des pieux, quelque soit l'entraxe. Cette perte de frottement semble compensée par la mobilisation de la charge sous le radier (jusqu'à 30% de la charge totale), ce qui donne au total des courbes charge - tassement des fondations mixtes toujours au-dessus de celles des groupes. On a mis en évidence la mobilisation différente du frottement entre les pieux centraux et latéraux, ainsi qu'une mobilisation différente entre la partie du pieu côté intérieur et extérieur du groupe. Le resserrement des pieux semble avoir un effet négatif sur l'efficacité du groupe. Celle-ci serait maximum pour l'entraxe le plus grand (au moins 5d, ce qui est plus fort que les valeurs admises couramment dans la pratique).

On a pu reproduire avec le modèle les résultats d'essais effectués en centrifugeuse par Horikoshi et Randolph (1999) sur une fondation mixte. D'autres comparaisons sont certainement nécessaires.

La méthode et les maillages présentés peuvent s'étendre très facilement à l'étude des colonnes ballastées ou des renforcements par inclusions rigides. L'outil numérique développé devrait donc nous permettre de traiter l'ensemble des problèmes de fondations dans les sols médiocres.

6. Bibliographie.

Borel.S. «Comportement et dimensionnement des fondations mixtes» Thèse, 2001, LCPC

Combarieu.C : « *Calcul d'une fondation mixte* » Note d'Information Technique, Ministère de l'Equipement et du Logement, LCPC, 1988

Commodromos.E.M: «Response prediction for axially loaded pile groups in clays using 3D nonlinear analysis», *16 ICSMGE-2005*, pp 2091-2094

Frank.R. « *Calcul des fondations superficielles et profondes* ». Presses de l'ENPC (1999)

Horikoshi.K and Randolph.M.F: «Estimation of overall settlement of piled rafts » *Soils and Foundations*, vol 39, No. 2, 59-68, 1999.

Nguyen.NT «Comportement des ouvrages dans les sédiments très mous». Rapport master 2 de recherche, MCGC, UJF, 2003

Poulos.H.G & Davis.E.H. « *Pile foundation analysis and design* ». 1980, John Wiley & Sons.

Poulos.H.G.«Piled raft foundations: design and application». *Géotechnique* 51, No2, 2001.

Randolph.M.F: «Design methods for pile groups and piled rafts ». Research report No.G1085, January 1994. The University of Western Australia

Viggiani.C «Pile groups and pile raft behaviour» *Conf. On Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, 1988 Balkema, Rotterdam ISBN 90 5809 0221.