

Nouveau montage expérimental pour l'étude du comportement d'une fondation mixte

New experimental set up for the study of the behaviour of a piled raft foundation

Nader Elayni¹, Philippe Reiffsteck¹, Fabien Szymkiewicz¹, Alain Le Kouby¹

¹ Université Gustave Eiffel, Département GERS, Laboratoire SRO, Champs sur Marne, France

RÉSUMÉ – Cette communication examine la variation du coefficient d'efficacité d'une fondation mixte, de la part de charge reprise par le radier et de l'effet que peut avoir une semelle sur les pieux. La première partie de la communication décrit le comportement des fondations mixtes et la seconde partie présente un montage expérimental de modèles réduits réalisés en laboratoire en 1g à l'université Gustave Eiffel.

ABSTRACT – This paper examines the variation of the coefficient of efficiency of a piled raft foundation, the share of load taken by the raft and the effect of the raft on piles. The first part of this paper describes the behaviour of piled raft foundations and the second part presents an experimental set-up of reduced models carried out in the laboratory in 1g at Gustave Eiffel University.

1. Introduction

Les bâtiments de grande hauteur étant de plus en plus courant d'une part, et la notion de coût environnemental étant maintenant centrale dans le secteur du BTP, les fondations mixtes alliant fondations profondes et fondations superficielles sont amenées à être de plus en plus fréquemment utilisées.

Les fondations mixtes consistent à associer une fondation superficielle qui est au contact du sol et un groupe de pieux reliés à la fondation superficielle. Deux stratégies de conception des fondations mixtes sont possibles :

- réduire les tassements par l'ajout de pieux lorsque la portance est assurée par la fondation superficielle mais que les tassements sont excessifs vis-à-vis de la structure projetée (Burland et al. 1977),
- augmenter la portance des fondations profondes en tenant compte de la portance supplémentaire apportée par la fondation superficielle, dans l'optique de limiter les coûts ainsi que l'emploi de matières premières.

Dans les deux cas, la combinaison de ces deux types de fondations implique que le comportement de la fondation mixte est différent des fondations prises séparément. En effet, l'ajout d'une semelle au contact du sol sur un groupe de pieux implique des interactions supplémentaires. La fondation superficielle interagit avec le sol, mais provoque aussi des changements sur le comportement du groupe de pieux. Ces changements s'ajoutent aux interactions déjà présentes sur le groupe de pieux tel que les effets de groupes (des interactions d'un pieu sur un autre pieu proche au sein d'un même groupe).

2. Généralités sur le comportement d'une fondation mixte

Lorsqu'un groupe de pieux est étudié, on compare la charge limite du groupe à la charge limite d'un pieu isolé multiplié par le nombre de pieux isolés dans le groupe. Cela permet d'obtenir le coefficient d'efficacité d'un groupe de pieu. Plus le coefficient est proche de 1

et plus la fondation est efficace. Certains auteurs étendent cette définition pour une fondation mixte tel que :

$$Q_{u,fm} = nC_{fm}(Q_{su,i} + Q_{pu,i}) \text{ Soit } C_{fm} = \frac{Q_{u,fm}}{n(Q_{su,i} + Q_{pu,i})} \quad (1)$$

Le coefficient d'efficacité C_{fm} défini par la littérature prend en compte que la charge des pieux. Borel (2001) a proposé de décomposer la charge limite de la fondation mixte avec des paramètres d'interactions au sein de cette fondation. L'équation (2) décrit la charge limite telle que :

$$Q_{u,fm} = n(C_{s,g}C_{s,c}Q_{su,i} + C_{p,g}C_{p,c}Q_{pu,i}) + C_{c,g}Q_{u,c} \quad (2)$$

avec n qui représente le nombre de pieux.

Les coefficients sont déterminés expérimentalement par des essais de chargement. Vesic (1969) et Phung (1993) ont défini une charge limite associée à un tassement identique pour la semelle isolée, le pieu isolé, le groupe de pieux et la fondation mixte. Cela permet d'avoir une cohérence lorsque les charges limites sont comparées.

Mandolini et al. (2005) ont étudié les données de 22 cas qui permettent d'observer l'interaction entre les pieux et le radier. De Sanctis et Russo (2008) ont tracé d'après les données collectées par Mandolini et al. (2005) la relation entre la charge reprise par le radier et la géométrie de la fondation mixte (Figure 1).

Dans la Figure 1, le rapport Q_R/Q_T représente la charge reprise par le radier par rapport à la charge total appliquée. Ce rapport est en fonction d'une quantité sans dimension $(A_G/A)/(s/D)$ nommée facteur de remplissage (Figure 1). On observe que pour un facteur de remplissage inférieur à 0.15, la charge reprise par le radier est toujours supérieure à 40%.

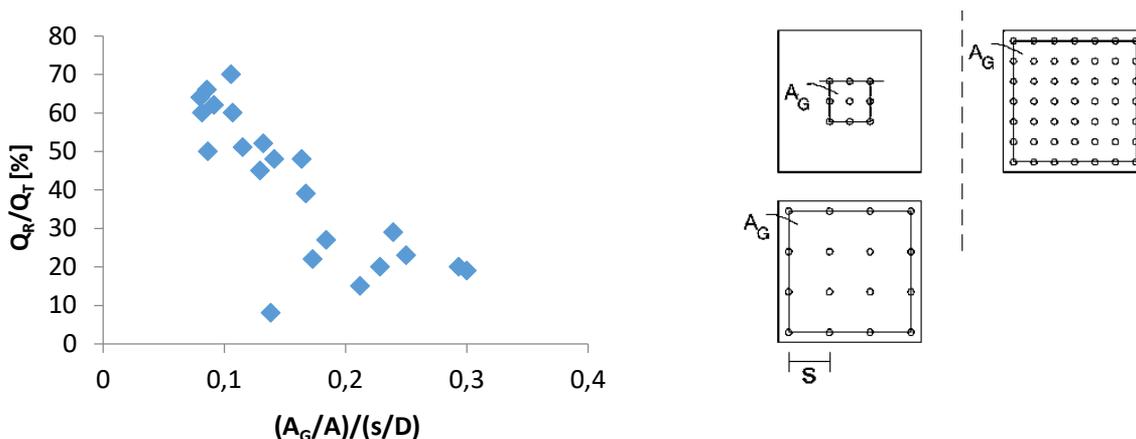


Figure 1 : Répartition de la charge entre les pieux et le radier en fonction du facteur de remplissage (Mandolini et al. 2005)

Afin de comprendre le comportement d'une semelle au sein d'une fondation mixte, on compare celle-ci à une semelle isolée qui est la référence. Liu et Yuan (1989) ont réalisé un modèle réduit 1g d'un chargement vertical de groupe de pieux forés et d'une fondation mixte. À l'issue des essais de chargement, il est démontré que la semelle provoque une augmentation du frottement des pieux due à la pression de contact du radier sur le sol. Les essais ont aussi montré la part de charge reprise par le radier qui augmente lorsque l'entraxe des pieux est supérieur à 5D et la longueur des pieux inférieure à 13.D. Cependant, Liu et Yuan ont fait varier l'entraxe des pieux en même temps que la largeur du radier.

Phung (1993) a réalisé des essais à une échelle moyenne (pieux d'une longueur de 2,3m) sur des fondations superficielles, des pieux isolés, des groupes de pieux et des fondations mixtes dans un sable dense ($I_D=0,67$ et $I_D=0,62$) et lâche ($I_D=0,38$). Il a observé que le frottement des pieux augmente dans une fondation mixte. Ceci est provoqué par la contrainte due à un contact du radier sur le sol comme l'ont montré Liu et Yuan (1989). Le sol sous la semelle est confiné sous le radier et ainsi le frottement du pieu augmente.

Phung (1993) a aussi comparé la contrainte sous la semelle pour une fondation mixte et une semelle isolée. On remarque que la contrainte sous la semelle pour une fondation mixte est proche d'une semelle isolée (Figure 2). Les propriétés du sol, comme l'indice de densité, montrent bien lors des essais de Phung (1993) qu'ils sont importants dans la compréhension du comportement de la fondation mixte. En effet, on observe bien que la semelle dans une fondation mixte provoque un confinement du sol plus important dans du sable lâche qu'une semelle isolée. La raison pour laquelle la semelle dans une fondation mixte a un effet plus important lorsque le sable est lâche est une question à étudier. Une densification du sol va provoquer un effort latéral supplémentaire sur le pieu et donc un frottement plus important. Il est dans l'intérêt de l'ingénieur d'exploiter cela afin d'améliorer la portance des fondations mixtes. Il est fondamental de comprendre le mécanisme qui améliore le frottement mais aussi, si cela est valable pour différents cas (différents sols, nombre de pieux, entraxe variable etc...).

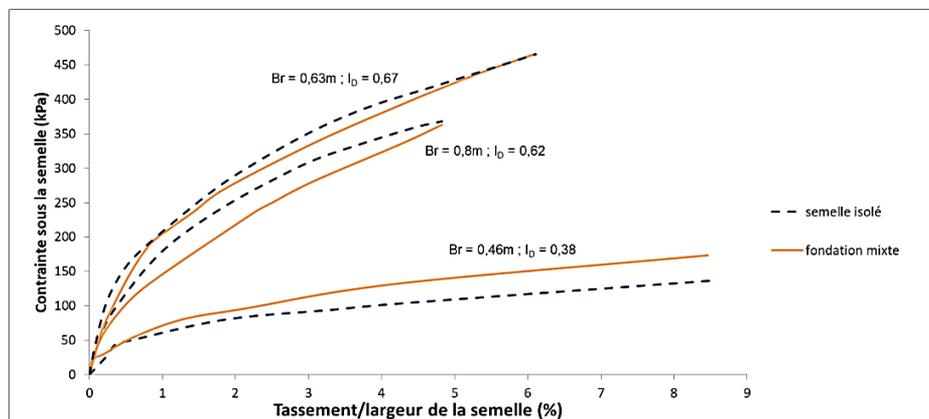


Figure 2 : Comparaison de la contrainte sous la semelle (Phung, 1993)

L'amélioration de la portance des pieux par l'effet de la semelle est encore en discussion. Des essais en centrifugeuse ont été réalisés afin de comparer la portance d'un pieu isolé par rapport à un pieu en fondation mixte (Horikoshi et Randolph 1997). Il est montré que le pieu en fondation mixte a un gain de portance d'environ 40% expliqué par l'augmentation de la contrainte dans le sol qui augmente le frottement axial du pieu. Cependant, d'autres études (exemple Liu et al. 1994) montrent qu'il y a une diminution du frottement axial du pieu par rapport à un groupe après la mise en place d'une semelle sur le sol.

Borel (2001) explique que ces différences entre les études tirent leur origine de la définition de la charge limite entre un groupe de pieux et une fondation mixte. En effet, pour saturer le frottement axial d'un pieu dans une fondation mixte, il est nécessaire d'avoir un déplacement plus important que pour un groupe de pieux (Phung, 1993).

L'analyse des essais trouvés dans la littérature nous permet donc de mieux comprendre le comportement d'une fondation mixte, mais aussi d'orienter notre axe d'étude pour la réalisation d'essais en modèle réduit 1g.

3. Modèle réduit

Cette section décrit le modèle réduit utilisé pour comprendre le comportement d'une fondation mixte. Il s'agit d'un modèle 1g qui préfigure les essais à N.g qui seront entrepris en centrifugeuse.

3.1. Mécanismes de rupture et conteneur

Afin d'assurer la validité des résultats des essais, nous devons nous assurer que le conteneur soit assez grand pour éviter les effets de bord. Il est nécessaire pour cela de respecter des rapports de dimensions permettant de limiter l'influence des conditions aux limites et les interactions avec les parois du conteneur. La distance $x.Br$ est déterminée en fonction de la distribution des efforts sous la semelle. La distance $y.L$ est déterminée en fonction de la distribution des efforts sous les pieux (Figure 3). Il existe trois mécanismes de rupture sous la fondation superficielle : rupture généralisée, rupture locale et rupture par poinçonnement. Ces trois mécanismes et avec la méthode du radier équivalent (détermine les tassements d'une fondation mixte) permettent d'évaluer la répartition des efforts sous la fondation mixte. Pour une fondation mixte, il existe deux mécanismes de ruptures (Kishida et Meyerhof, 1965).

- Une rupture par bloc pour des pieux suffisamment proche. C'est une zone de rupture qui se produit aux alentours du groupe en entier et sous la semelle.
- Le second type de rupture est la rupture individuelle de pieux. La zone de rupture sous la semelle est plus large, mais la zone de rupture aux alentours des pieux est localisée pour chaque pieu individuellement. Celle-ci se produit lorsque les pieux sont suffisamment espacés (en pratique $s > 4D$).

Il est donc nécessaire, afin d'observer et d'étudier les mécanismes de ruptures, de réaliser les essais dans un conteneur aux dimensions suffisamment grandes. Ainsi, il permet aussi d'éviter les effets de bords mais aussi de réaliser plusieurs installations de fondation au sein du conteneur. Le conteneur possède une distance $x.Br$ de 1,32m et $y.L$ de 1,2m.

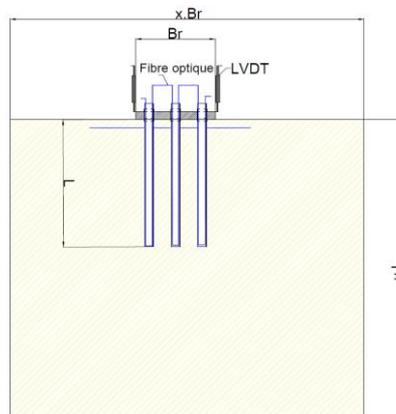


Figure 3 : Dimensions globales du massif

3.2. Pieux modèle

Le modèle de pieux qui sera utilisé lors des essais est un tube en laiton composé d'un filetage externe afin d'avoir une certaine rugosité.

Le diamètre externe (y compris le filetage) du pieu est de $D = 17\text{mm}$. Cette valeur est choisie pour des raisons techniques et de disponibilité. En effet plus le diamètre augmente et plus l'espacement entre les pieux sera grand. Cela implique de réaliser des espacements plus grand, un radier plus grand et donc un conteneur qui aura une taille plus importante.

Le diamètre optimal et qui correspond à la majorité des pieux modélisés dans la littérature pour les modèles réduit est de 17mm. La longueur fichée dans le sol (L) est de 14.D soit L/D=14.

Poulos (1968) a étudié l'interaction pieu/sol pour un pieu isolé sous un radier en contact avec le sol. L'auteur a conclu que plus le rapport de la longueur du pieu sur le diamètre diminue et plus l'influence du radier en contact avec le sol (qui a pour rôle de réducteur de tassement) est important. Il remarque aussi qu'à partir d'une longueur $L < 10.D$, l'influence du contact du radier n'est plus négligeable et prédomine dans le comportement de la fondation. Ainsi le choix d'une longueur d'encastrement de 14.D permet d'avoir une charge reprise par les deux types de fondations.

Deux types de groupes de pieux sont testés : 9 pieux pour une semelle carrée et 7 pieux pour une semelle circulaire (Figure 4). L'entraxe choisi est de 3D dans un premier temps mais il variera au cours des essais. Par ailleurs, les essais comprennent aussi le chargement d'un pieu isolé et d'un radier seul.

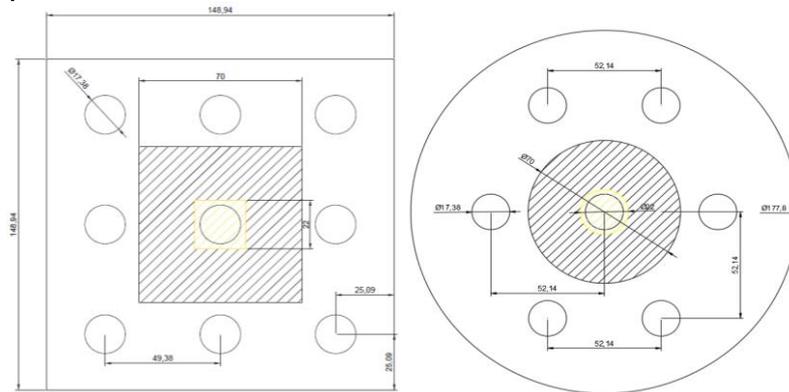


Figure 4 : Répartition des pieux sur les semelles carrées et circulaires

Un programme de chargement par palier jusqu'à la rupture conventionnelle (l'observation d'un fluage) sera mis en œuvre.

3.3. Conception du radier modèle

Le radier est constitué d'une plaque carrée en acier de module $E_r = 210$ GPa (et $\nu_r = 0,33$). La longueur de la semelle carrée atteint une valeur de 149 mm et une valeur de 178 mm de diamètre pour la semelle circulaire. Pour simuler une plaque rigide, Poulos et Davis (1980) ont défini la condition suivante :

$$\frac{\pi B_r^3 E_s}{k(1-\nu_s^2)} < \frac{8}{\left(\frac{E_r}{E_s}\right)^{1/2}} \text{ avec } k = \frac{E_r t^3}{12(1-\nu_r^2)} \quad (2)$$

L'épaisseur de la plaque estimée qui permet de simuler un radier rigide est de 1,5 cm pour notre cas. De même, Horikoshi et Randolph (1997) définissent le paramètre de rapport de rigidité qui contrôle le tassement différentiel d'un radier rectangulaire :

$$K_{rs} = 5,57 \frac{E_r(1-\nu_s^2)}{E_s(1-\nu_r^2)} \left(\frac{B_r}{L}\right)^{0,5} \left(\frac{t}{L}\right)^3 \quad (3)$$

En considérant les dimensions du modèle choisi, nous obtenons un rapport de rigidité égale à 0.8 pour une épaisseur de 1,5cm. Si le radier possède une épaisseur de 0,6 cm, on obtient une valeur de 0,05.

Clancy (1993) définit le rapport de rigidité pour un radier circulaire :

$$K_{rs} = \frac{E_r(1-\nu_s^2)}{E_s(1-\nu_r^2)} \left(\frac{t}{r}\right)^3 \quad (4)$$

avec r le rayon du radier circulaire.

Pour le modèle circulaire, nous obtenons un rapport de rigidité égale à 0.67 pour une épaisseur de 1,5 cm. Si le radier possède une épaisseur de 0,6 cm, la valeur est de 0,04.

3.4. Sol et mis en place

Le sol utilisé pour les essais est un sable d'Hostun nommé HN31. Les caractéristiques du sable et la granulométrie fournie par le fournisseur sont présentées dans le Tableau 1 et la Figure 5 :

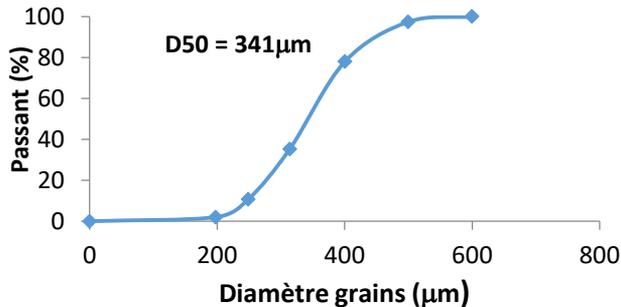


Tableau 1 : Caractéristique du sable d'Hostun HN31

Caractéristiques HN31	
ρ_s	$2,65 \text{ g/cm}^3$
e_{\min}	$0,624$
e_{\max}	$0,961$
γ_{\max}	$15,99 \text{ kN/m}^3$
γ_{\min}	$13,24 \text{ kN/m}^3$
D_{50}	$341 \mu\text{m}$

Figure 5 : Granulométrie du sable d'Hostun HN31

La constitution d'un sol à une densité requise en laboratoire est fondamentale pour la résolution des problèmes géotechniques. Les sols sableux sont reconstitués en laboratoire à l'aide de diverses méthodes : pluviation ou vibration. La pluviation des particules de sable est la méthode privilégiée. Elle produit des échantillons homogènes et reproduit le processus de dépôt naturel des sables (Le Kouby, 2003).

Vaid et Negussey (1984) et Levacher et al. (1994), ont mené des études de pluviation sur différents types de sable (sable de Leighton Buzzard, d'Ottawa, Hostun, Fontainebleau etc...) et ont montré que la densification par pluviation dans l'air est efficace pour des hauteurs de chute comprises entre 0 et environ 50 cm. Levacher et al. (1994), ont démontré qu'à partir de 1,2m de hauteur, la vitesse du sable d'Hostun est constante. Pour réaliser l'essai 1g, un système de trémie permet de simuler la pluviation (Figure 6). Un système de tranquillisation du flux non représenté ici vient la compléter.

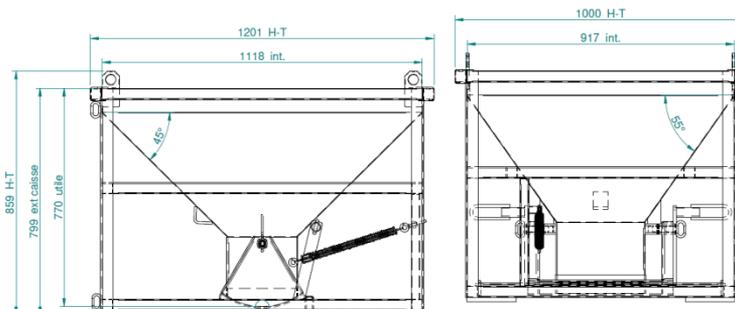


Figure 6 : Dimensions de la trémie

Ainsi, la mise en œuvre du sable dans un conteneur en laissant tomber le sable d'une hauteur constante permet de contrôler la densité du sol. Nous pourrions donc faire varier la densité du sable et passer d'un état moyennement lâche ($I_D < 0,40$) à dense ($I_D > 0,60$).

3.5. Instrumentation

Le modèle réduit est instrumenté avec un capteur de force de 10kN (Figure 7), de fibre optique (Figure 8) pour mesurer la déformation des pieux et dans le sable et de LVDT pour mesurer le déplacement. La fibre optique est placée à l'intérieur des tubes filetés, sous la semelle et dans le sol. Des mesures de la déformation du pieu et donc du frottement pourront être réalisées. La fibre installée sous la semelle permettra d'avoir les champs de déformation induits dans le sol par la semelle et donc le mécanisme de rupture

engendré par la fondation mixte. La fibre optique peut avoir une influence sur le comportement du sol si elle est assez rigide pour renforcer le sol. Cependant la fibre optique est très fine (0,9mm de diamètre) et est assez souple pour se déformer avec le sol. Il sera fait une comparaison avec d'autres capteurs (jauge de déformation par exemple) pour évaluer l'effet de la fibre. Un vérin hydraulique de 50kN permettra d'assurer le chargement des fondations.

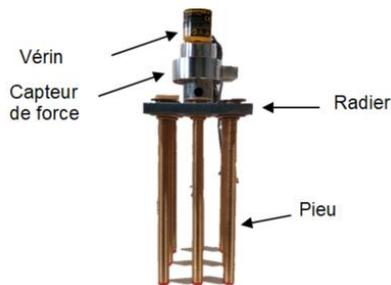


Figure 7 : Modèle réduit

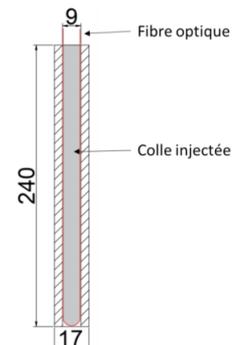


Figure 8 : Fibre optique dans le pieu (en mm)

4. Conclusions et perspectives

La mise en place d'ouvrage ayant une descente de charge importante ou reposant sur des fondations mises en place dans un sol à faibles résistances mécaniques implique des éventuels problèmes sur les fondations. Les problèmes liés aux fondations qui peuvent être rencontrés sont : la faible capacité portante, le tassement différentiel ou total important. Afin de répondre à ces problématiques, les ingénieurs mettent en place des fondations adaptées, comme les fondations profondes (pieux isolés ou groupes de pieux) ou les fondations mixtes (association d'un radier et d'un groupe de pieux).

Pour mieux comprendre le comportement d'une fondation mixte, les paramètres qui affectent la portance ou le tassement d'une telle fondation ont été étudiés dans cette communication. De plus, une définition d'un coefficient d'efficacité d'une fondation mixte a été présentée qui permet de prendre en compte les interactions du radier avec le sol. La répartition de la charge au sein d'une fondation mixte dépend du facteur de remplissage (rapport de surface occupé par les pieux et la semelle). Il a été démontré que pour un facteur de remplissage inférieur à 0,15, la charge est reprise par le radier à 40% (Figure 1). La densité du sol a aussi un rôle important. Phung, (1993) avait démontré que pour un sable lâche ($I_D = 0,38$) la semelle d'une fondation mixte engendre plus de contrainte que la semelle isolée.

Ainsi un nouveau modèle expérimental à échelle réduite a été conçu à l'Université Gustave Eiffel. Ce modèle permettra d'effectuer une étude paramétrique en faisant varier divers paramètres du groupe de pieux (longueur et entraxe) et du radier (épaisseur et largeur). Le sol sera mis en place par pluviométrie et instrumenté par fibre optique. Puis le modèle réduit sera instrumenté par fibre optique, LVDT et un capteur de force.

Des essais sont prévus en centrifugeuse qui permettront de valider les résultats 1g.

Glossaire					
Symbole	Unité	Définition	Symbole	Unité	Définition
B_r	mm	Largeur radier/semelle	A_G	mm ²	Surface occupée par les pieux
D	mm	Diamètre pieu	A	mm ²	Aire totale du radier
L	mm	Longueur pieu	s	mm	Entraxe (centre à centre)
E_s	MPa	Module du sol	I_D	%	Indice de densité
E_r	MPa	Module du radier	ν_s	-	Coefficient de Poisson du sol
k	MN.mm	Rigidité à la flexion	ν_r	-	Coefficient de Poisson du radier
K_{rs}	-	Rapport de rigidité	t	mm	Épaisseur radier
$Q_{u,fm}$	kN	Charge limite fondation mixte	a	mm	Longueur radier

$Q_{su,i}$	kN	Charge par frottement axial pieu isolé	$C_{s,g}$	-	Coefficient efficacité frottement groupe de pieux
$Q_{pu,i}$	kN	Charge en pointe pieu isolé	$C_{p,g}$	-	Coefficient efficacité pointe groupe de pieux
$Q_{u,c}$	kN	Charge limite semelle isolée	$C_{s,c}$	-	Rapport frottement axial groupe pieux en fondation mixte et groupe de pieux
$C_{c,g}$	-	Rapport charge limite semelle en fondation mixte et isolée	$C_{p,c}$	-	Rapport résistance pointe en fondation mixte et groupe de pieux

5. Références

- Borel, S., (2001). Comportement et dimensionnement des fondations mixtes. Etudes et recherches des LPC, LCPC, 351 pages.
- Bowles, J. E., (1997). Foundation design and analysis. McGraw-Hill, New York, USA.
- Burland, J. B., Broms, B.B., De Mello, V.F.B., (1977). Behaviour of foundations and structures. In Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokio, Japan, Vol. 2, pp.495-546.
- De Sanctis, L., Russo, G., (2008). Analysis and performance of piled rafts designed using innovative criteria. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 134 (8), pp. 1118-1128.
- Dubreucq, T., Gamier, J., Favraud, C., (1995). Effet de groupe de micropieux sous charge axiale. Rapport du projet national de recherche FOREVER, N° : FO/94/06. 22.
- Horikoshi, K. et Randolph, M.F., (1997). On the definition of raft-soil stiffness ratio for rectangular raft. Géotechnique, Vol. 47, NO. 5, pp. 1055-1061.
- Kishida, H. et Meyerhof, G.G., (1965). Capacité portante d'un groupe de pieux soumis à des charges excentrées dans le sable. Comptes rendus du 6e CIMSTF, Montréal.
- Le Kouby, A., (2003). Etude du comportement mécanique de micropieux sous chargements monotones et cycliques verticaux. Application aux effets de groupe. Ph.D. thesis. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Levacher, D., Garnier, J., Chambon, P., (1994). Reconstitution d'éprouvettes de sable. Appareil de pluviation. Revue française de géotechnique. NO. 68, 49-56.
- Liu, J., Huang, Q., Li, H., Li, X., HU, W., (1994). Experimental research on bearing behaviour of pile groups in soft soil. Proceedings 13th international conference on soil mechanics and foundation engineering, New Delhi, vol. 2, pp. 535-528.
- Liu, J., Yuan, Z., (1989). Comportement et problèmes de calcul des groupes de pieux dans le limon. Bull. Liaison des lab. des Ponts et Chaussées, NO. 160:21-35.
- Mandolini, A., Russo, G. et Viggiani, C., (2005). Pile foundations: experimental investigations, analysis and design. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 16ICSMGE, Osaka.
- Poulos, H.G., (1968). Analysis of the Settlement of Pile Group. Geotechnique. Vol 18, No 4, pp. 449-471.
- Poulos, H.G., Davis, E.H., (1980). Pile foundation analysis and design. Wiley Series in Geotechnical Engineering, 1st Edition, New York, John Wiley Ed., pp. 20-32.
- Phung, D.L., (1993). Footing with settlement-reducing piles in non-cohesive soil. Ph.D. thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Vaid, YP., Negussey, D., (1984). Relative density of pluviated sand samples. Soils Found 24(2):101-105.
- Vesic, A.S., (1969). Experiments With Instrumented Pile Groups in Sand. ASTM Spec. Tech. Publ. No. 444, pp. 177-222.
- Vesić, A.S., (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. Vol 99, P45-73.