



L'interaction sol-pieu sous impact latéral

Masoud Hajjalilue Bonab¹, Jean-Louis Chazelas², Daniel Levacher³

¹*Doctorant de Université de Caen, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, BP 4129, 44341 Bouguenais, France, tel:0240845800, h-bonab@lcpc.fr*

²*Chercheur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, BP 4129, 44341 Bouguenais, France, tel:0240845800, chazelas@lcpc.fr*

³*Professeur des Universités, Université de Caen - M2C- GRGC- UMR 6143 CNRS, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France, tel:0231565709, daniel.levacher@geos.unicaen.fr*

Résumé:

Dans certains ouvrages comme les quais, les ducs d'Albe et les pieux d'amarrage des navires, l'impact horizontal peut être la sollicitation déterminante pour la conception et le dimensionnement des pieux. L'interaction sol-pieu sous choc latéral n'est pas encore complètement comprise car les données expérimentales font défaut. C'est pourquoi une étude a été entreprise sur modèles réduits centrifugés. Dans un premier temps un système de génération d'impacts horizontaux a été conçu. Ce système est capable de solliciter le pieu modèle de manière répétitive pour différentes amplitudes de choc. Des études paramétriques à l'aide de pieux modèles instrumentés ont été effectuées. Les mesures en fonction du temps concernent pour la tête du pieu: l'accélération, le déplacement et l'effort ainsi que les moments fléchissants déduits des mesures de déformation obtenues à l'aide de jauges réparties le long du pieu. Le pieu instrumenté a été testé sous différents niveaux d'impacts répétés ou non et pour différentes masses représentant le massif de tête de pieu. La réponse et le comportement du pieu sous chocs répétitifs sont étudiés. Une première tentative de modélisation dynamique non linéaire en éléments finis utilisant les résultats d'essais statiques a permis d'exploiter les données expérimentales en termes de raideur non linéaire et d'amortissement dans l'esprit du modèle de Winkler.

Abstract:

Many coastal structures such as quays, dolphins, docking piers are submitted to impact loads which are of major importance for designing. In order to increase the experimental data and to improve the understanding of the soil pile interaction under horizontal impact loads, some parametric centrifugal studies have been performed. First impact systems have been developed to be able to give repeatable shocks for different energies so as to be representative of natural shocks from ships during the docking. Single flexible piles are equipped with pile caps of different masses, with acceleration and displacement transducers at the pile top, and with strain gauges along the pile. Analyses are conducted on the whole measurements in function of the time and the chosen parameters for the experiments. Feasibility through the repeatability of tests and the modelling of models has been demonstrated. The validity of the model of impact needed the development of a type of impact device. The results are discussed on the transmitted energy, on the shape and amplitude of the impact. Following experimental results, a first numerical approach is proposed with simple models.

1.Introduction

Les pieux isolés - *ducs d'Albe d'amarrage* - et les groupes de pieux de structures portuaires - *appontements, quais* - subissent des charges latérales variables dans le temps. Elles sont générées par la houle, les vagues,... Elles sont de nature cyclique. Fréquemment et dans des cas extrêmes, les structures sont soumises à des chocs lors d'accostage de navires. Il s'agit alors de charges latérales dynamiques dont l'évaluation est complexe étant donné le caractère aléatoire de ce type de sollicitation. Cependant bon nombre d'ouvrages se trouvent ainsi endommagés. Le comportement de pieux verticaux soumis à des impacts latéraux dépend de nombreux paramètres difficilement maîtrisables ce qui montre toute la difficulté de l'analyse du système « sol-pieu-chargement dynamique » et du dimensionnement des pieux. Ceci explique que les recommandations actuelles sont très simplifiées voire inadéquates car elles ne traduisent pas correctement ce phénomène.

Si de nombreuses recherches expérimentales et théoriques ont été menées pour des charges cycliques répétées à des vitesses de chargement faible, [14], sur des pieux isolés ou en groupes; en dynamique elles concernent essentiellement des essais dynamiques in situ destinés à l'évaluation des paramètres d'interaction, [7]. L'utilisation de ces essais comme le *Statnamic*, [6], reste limitée de par leur coût mais aussi parce que les résultats obtenus sont liés au site et sont donc difficilement transposables à d'autres cas d'étude. Devant ce constat, de nouvelles recherches [2,3,4] apparaissent nécessaires pour comprendre et analyser les phénomènes d'interaction sol-pieu en dynamique.

La modélisation en centrifugeuse constitue une alternative intéressante aux essais en vraie grandeur non répétables et onéreux, [1]. Des études paramétriques sont envisageables avec des conditions expérimentales parfaitement contrôlées. Encore faut-il que ces expériences soient représentatives du problème étudié et que les conditions de similitude soient respectées. De plus, à l'heure actuelle, peu d'essais et d'études en centrifugeuse ayant pour objectif la détermination des paramètres d'interaction dans le cas de pieux isolés soumis à des impacts latéraux ont été entrepris. C'est pourquoi, des premières séries d'essais sur modèles réduits de pieux centrifugés installés dans un sable sec subissant des chocs ont été réalisés et ce, dans le but de:

- 1- démontrer la faisabilité d'essais de pieu sous choc,
- 2- valider cette modélisation en vérifiant les effets d'échelle,
- 3- justifier la représentativité de l'essai.

Les résultats et analyses développés dans cet article concernent ces trois objectifs. Précisément, il s'agit de la répétitivité des essais avec la reconstitution du massif, la mise en place du pieu et la mise au point d'un générateur d'impact. L'étude des effets d'échelle a été abordée par un "modelling of models" et a porté sur l'analyse des réponses du pieu soumis à des chocs pour deux échelles de réduction différentes.

Confortés par les conclusions et les analyses de ces essais de qualification qui ont permis de valider cette modélisation physique de pieu soumis à des chocs, la représentativité de l'essai se traduit aussi par l'aspect énergétique au niveau de l'impact. Il est alors proposé une étude sur le développement de générateur d'impacts. Quelques résultats sont rapportés. Au delà de cet aspect expérimental, des simulations numériques du système sol-pieu soumis à des chocs sont évoquées à l'aide de modèles simples.

2. Essais sur modèles centrifugés

Le principe et les conditions de similitude de la modélisation en centrifugeuse ont été étudiés et sont maîtrisés dans de nombreux cas [1]. Pour résumer, si on étudie un ouvrage réel ou prototype au moyen d'un modèle réduit à l'échelle $1/N$, le champ de contraintes dans le sol modèle sera identique à celui du prototype si on applique N fois le champ de gravité terrestre g . Le tableau 1 rappelle les facteurs d'échelle pour certains paramètres.

Tableau 1 : Quelques facteurs d'échelle
Table 1: Some scale factors

Grandeur physique	Facteur d'échelle
Masse volumique	1
Masse	$1/N^3$
Longueur	$1/N$
Déplacement	$1/N$
Déformation	1
Contrainte	1
Force	$1/N^2$
Énergie	$1/N^3$
Temps	$1/N$
Accélération	N
Vitesse	1

3. Dispositif expérimental

3.1 Massif de sol

Le massif de sol est reconstitué par pluviation d'un sable de Fontainebleau dans un conteneur rectangulaire ($1200 \times 800 \times 360$ mm). Le rapport entre le diamètre des pieux utilisés et la taille des grains varie de 50 à 90, ce qui est très supérieur à la valeur minimale de 40 généralement acceptée comme limite pour les effets de taille. La pluviation permet d'obtenir un massif homogène de densité choisie et reproductible. La pluviation est réalisée au moyen d'une trémie automatique conçue au L.C.P.C.. Elle produit un massif de sol très homogène avec une densité contrôlée (moins de 1% de variation, [13]). Le poids volumique retenu dans le cas de nos essais est de $16,3 \text{ kN/m}^3$ (I_D de 0,89).

Tableau 2 : Quelques propriétés physiques du sable de Fontainebleau

d_{50} (mm)	γ_s (kN/m^3)	$\gamma_{d \text{ min}}$ (kN/m^3)	$\gamma_{d \text{ max}}$ (kN/m^3)	$e_{\text{min.}}$	$e_{\text{max.}}$
0.2	26,44	13,64	16,83	0,616	0,940

3.2 Pieu instrumenté

Afin de bénéficier des données acquises lors d'essais statiques, le pieu modèle est identique à celui utilisé dans les travaux de Mézazigh [9] et Remaud [11]. Le tableau 3 rassemble les dimensions du pieu prototype choisi, les règles de similitude applicables aux modèles réduits et issues des équations de la dynamique et les dimensions des pieux modèles. Afin de prendre

en compte les effets d'inertie, une masse pouvant représenter une superstructure a été placée en tête de pieu. Elle fournit par ailleurs un support pour les mesures réalisées en tête de pieu.

Tableau 3 : Rapports de similitude et dimensions des pieux modèles et prototype
Table 3: Scale factors, prototype and model pile dimensions

	Dimension du pieu prototype	Dimension du pieu modèle à 40 g	Dimension du pieu modèle à 60 g
Diamètre (m)	0,72	0,018	0,012
Longueur totale (m)	15,2	0,38	0,253
Longueur de fiche (m)	12	0,30	0,20
Moment d'inertie I_y (m ⁴)	$6.83 \cdot 10^{-3}$	$2.67 \cdot 10^{-9}$	$5.27 \cdot 10^{-10}$
Masse (kg)	13000	0,2031	0,0602

Un pieu de dimensions réduites, égales au 1/60^e des dimensions du pieu prototype, a été fabriqué pour vérifier les conditions de similitude en réalisant des essais de type "modelling of models". Les résultats obtenus sont présentés au 4.2 et en détail dans la référence [3]. Pour mesurer les déformations et en déduire les moments et déplacements, les pieux modèles à 40g sont instrumentés de jauges de déformation montées en ½ pont, voir figure 1. Pour ce faire, 20 paires de jauges ont été réparties sur la fiche du pieu tous les 15 mm à partir de la surface. Les jauges sont collées sur la surface extérieure du tube et protégées par un revêtement de type résine époxy. La présence des jauges collées extérieurement interdit la mise en place du pieu en macrogravité avec refoulement du sol sans détériorer les jauges : les pieux sont donc battus à 1 g.

Pour éviter un amortissement dû à l'instrumentation, le déplacement de la tête du pieu est mesuré à l'aide d'un capteur laser avec processeur intégré qui permet un échantillonnage à 40kHz. Afin de valider cette mesure, l'accélération de la tête du pieu est enregistrée à l'aide d'un accéléromètre piézo-électrique installé sur la masse en tête de pieu. Afin d'évaluer l'impact reçu par la masse en tête du pieu, un capteur de force a été placé sur le pieu au point d'impact du canon à bille. Un matériau amortissant a été collé sur le capteur de force côté impact afin d'allonger le temps de choc. Comme le capteur se trouve après ce matériau, au contact direct de la masse, la grandeur mesurée est bien la force appliquée à celle-ci.

3.3 Générateur d'impacts

La conception d'un générateur d'impacts a été délicate. Les contraintes inhérentes à ce matériel, sont nombreuses et difficiles à prendre en compte. La première est de pouvoir répéter le choc sans arrêter la centrifugeuse, et ce en maintenant la maîtrise de ce choc (répétitivité) en amplitude et en durée. Il faut aussi que la quantité de mouvement cédée au pieu puisse être commandée en faisant varier la force maximale du choc. Enfin, il faut que le système résiste aux effets de la centrifugation, c'est-à-dire que sa puissance supporte les accroissements d'inertie et de frottement. Différents dispositifs ont été testés qui ont conduit à un système électromagnétique présenté à la figure 1.

L'impact est produit avec un canon à bille électromagnétique qui accélère une bille en acier. Ce canon consiste en un tube servant de guide supportant un bobinage. La bobine est alimentée par une décharge impulsionnelle élevée et de courte durée à l'aide de condensateurs, le déclenchement est assuré par un générateur de signal situé dans la salle de

commande. La sortie du canon est proche du point d'impact, environ un cm, de sorte que la bille revienne dans le canon. Une légère inclinaison du guide tubulaire permet, grâce à la pesanteur, de ramener en arrière la bille à sa position initiale, ainsi prête pour être à nouveau projetée. Une diode infrarouge située à la sortie du canon permet une évaluation de la vitesse de la bille avant et après l'impact, donnant accès à la quantité de mouvement fournie au système. Cette évaluation a été validée par l'intégration de la force sur la durée de choc. Le système conçu permet de répéter ou de cumuler des impacts en cours de centrifugation pour des études d'endommagement et de fatigue. La variation de la tension des condensateurs et de la durée d'impulsion modifie l'amplitude de la force appliquée. Ce dispositif est parfaitement adapté pour produire des impulsions en force de type fonction de Dirac. Cependant comme il est difficile d'augmenter la durée du contact, une deuxième génération d'impacteur est en cours de qualification.

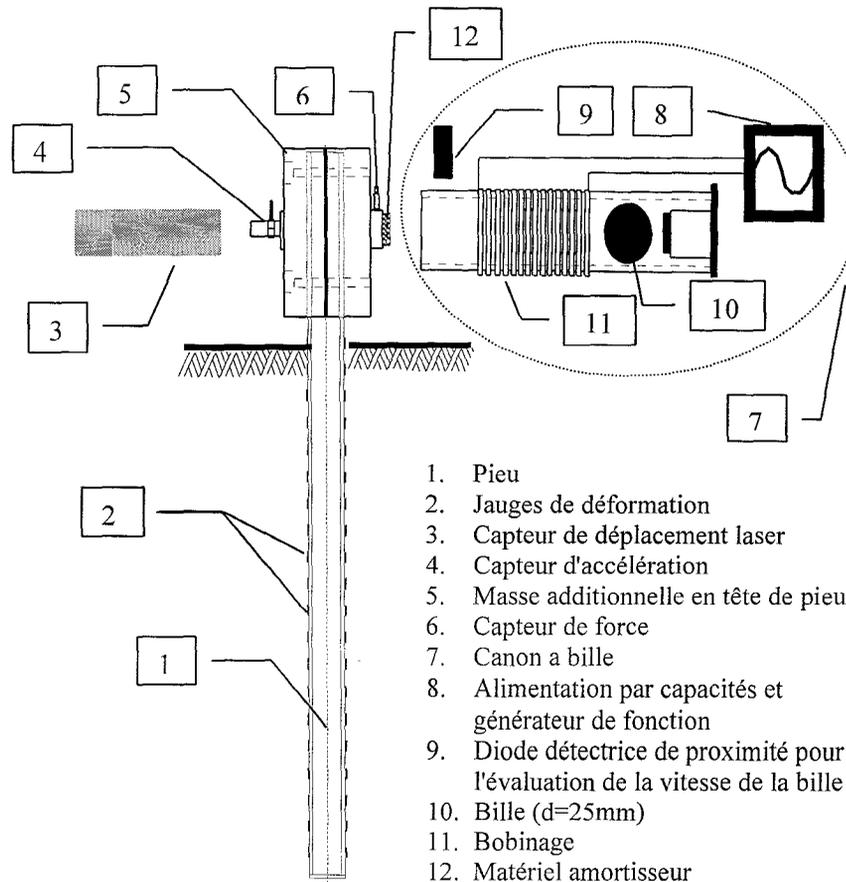


Figure 1: Représentation schématique du générateur d'impact et du pieu instrumenté
 Figure 1: Schematic view of experimental set up: pile instrumentation and impact system

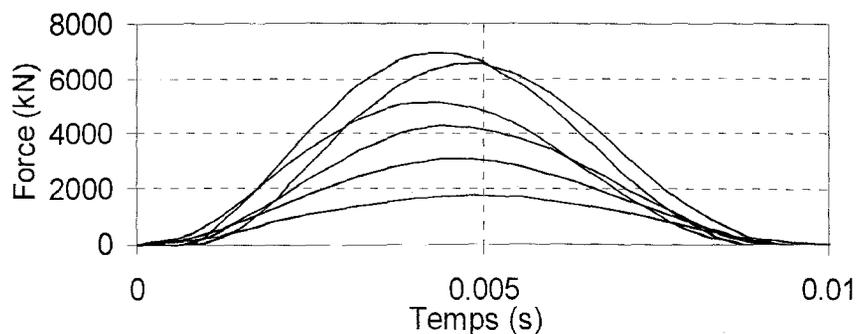


Figure 2: Les formes d'impact appliqués sur le pieu-données prototype
 Figure 2: Shapes of applied impact to the pile – prototype data

4. Les résultats expérimentaux

Dans le cadre d'un programme général de recherche sur le comportement de pieux sous charges latérales, différents types d'essais ont été réalisés. Dans cet article, seuls quelques résultats obtenus sont présentés pour des pieux soumis à des chocs latéraux. Rappelons que les courbes P-y statiques utilisées proviennent de recherches antérieures, elles servent de base à la modélisation numérique. Une évaluation des effets d'échelle a été menée à l'aide d'une étude de type "modelling of model". S'ensuit une étude de l'effet de masses additionnelles simulant une superstructure en analysant la réponse du point des fréquences et des déplacements. Toutes les grandeurs physiques par la suite sont exprimées en données prototype.

4.1 Courbes P-y statiques

Les courbes P-y statiques présentées à la figure 3 ont été obtenues et calculées pour le même pieu et le même massif de sable grâce à une étude précédente réalisée en centrifugeuse par Remaud [11]. L'étude est basée sur l'analyse des profils de moments fléchissants lors du chargement statique. Ces profils de moments fléchissants sont déduits à partir des mesures de déformation. Pour un effort latéral donné -sans effort vertical-, la distribution des moments fléchissants M , en fonction de la profondeur z , est utilisée pour obtenir les profils de réaction du sol le long du pieu P , par double dérivation, et la déformée latérale du pieu y , par double intégration, d'après les équations suivantes:

$$P = \frac{d^2 M}{dz^2} \quad (1)$$

$$y_{(z)} = \iint \frac{M_{(z)}}{EI} dz dz + C_1 z + C_2 \quad (2)$$

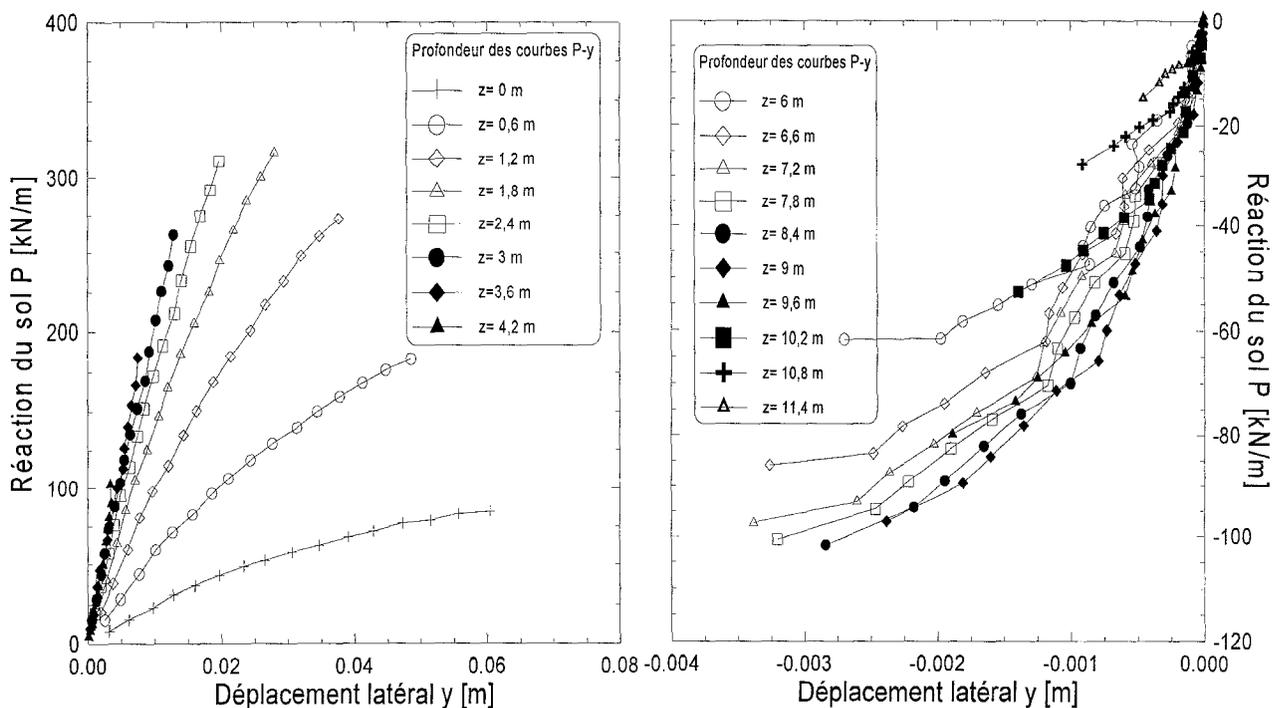


Figure 3 : Les Courbes P-y statiques [11]
 Figure 3 : Static P-y curves [11]

4.2 Etude des effets d'échelle

La technique du "modelling of models" consiste à comparer le comportement du même pieu prototype à deux échelles de réduction : $1/40^e$ et $1/60^e$. L'expression des résultats d'essais pour deux échelles différentes en données prototype permet d'apprécier les effets d'échelle et de vérifier les conditions de similitude. La comparaison des comportements aux deux échelles a été fondée sur le déplacement maximal en tête du pieu et la fréquence pic du spectre. Les résultats obtenus ont montré que le déplacement en tête exprimé en fonction de la quantité de mouvement contenue dans le choc – calculée par intégration temporelle de la force – était cohérent aux deux échelles de réduction[3]. La fréquence pic observée dans les deux cas est très proche. Compte tenu du nombre d'essais réalisés, on peut dire qu'il n'y a pas d'effet d'échelle pour ces niveaux d'accélération et pour les échelles de réduction étudiés. Même si les échelles paraissent voisines, d'autres travaux de recherche sur des pieux soumis à des chocs –cas du battage- ont confirmé pour un intervalle des échelles plus étendu qu'il n'y avait pas d'effet d'échelle,[12]. Le comportement du pieu prototype est semblable tant en amplitude de réponse qu'en réponse spectrale de l'oscillation libre.

4.3 L'effet du nombre d'impacts

L'étude du comportement du pieu sous des impacts répétés est intéressante, d'une part si la réponse n'avait pas changé après des impacts répétés constants, cela aurait simplifié le programme expérimental et d'autre part, les structures et les défenses d'accostage dans les ports sont soumises à des impacts horizontaux réitérés. Pour ce faire un pieu avec des masses additionnelles en tête dites de superstructure a été testé sous des impacts horizontaux constants et répétés. Des résultats sont montrés sur la figure 4. Une des premières conclusions est d'observer que la fréquence de résonance varie et tend à augmenter. Ceci peut être attribué au phénomène de densification du sol autour du pieu. Cette modification de la fréquence de résonance se stabilise après quelques impacts. Par exemple la différence entre le 20ème et le 30ème impact est négligeable.

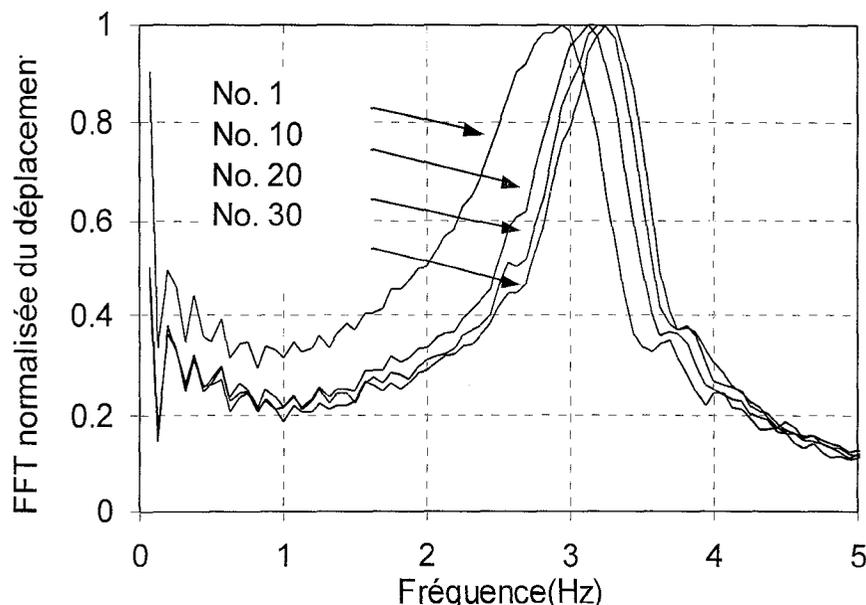


Figure4: L'effet du nombre d'impacts sur la réponse fréquentiel
 Figure 4 : Number of impacts on the frequency response

4.4 L'effet des masses additionnelles dites de superstructure sur la réponse

4.4.1 La réponse fréquentielle

Afin d'évaluer l'influence de la masse de superstructure sur la réponse du pieu, quatre masses ont été installées en tête de pieu. La figure 5 donne les spectres obtenus. Les fréquences de résonance sont égales à : 1.66Hz, 2.10Hz, 3.20Hz et 4.15Hz respectivement pour les masses de 54.4 t, 32 t, 13.2 t et 6.4 t.. Comme prévu, avec l'augmentation de la masse, la fréquence de résonance s'élève.

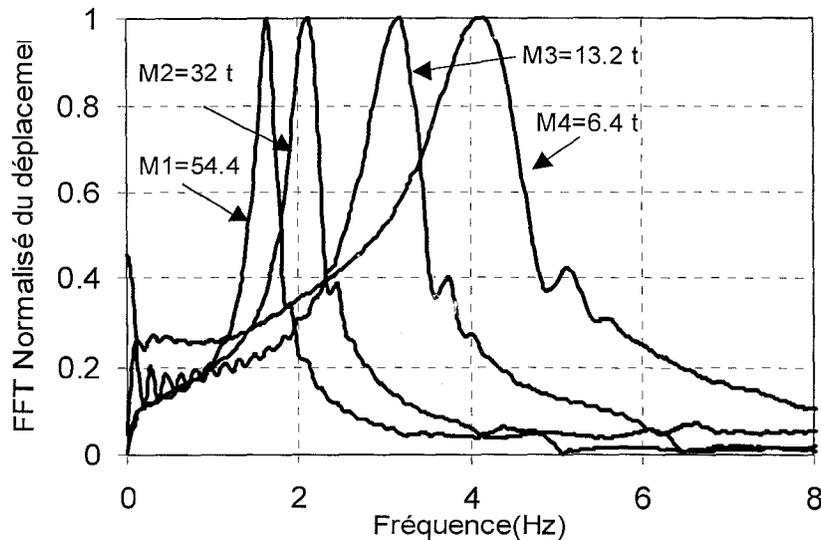


Figure 6: L'effet de la masse de superstructure sur la réponse fréquentiel
 Figure 6: Effect of pile cap mass on the frequency response

4.4.2 Déplacement

La masse de superstructure devrait également avoir une influence sur le déplacement du pieu. Des impacts avec différentes amplitudes de force ont été appliqués sur les pieux. Les déplacements maxima observés en fonction de la quantité de mouvement sont comparés et ce, pour les deux masses additionnelles, voir figure 6. Le déplacement maximal de la tête du pieu obtenu avec la masse M_3 est plus élevé que celui obtenu avec la masse M_2 . Et cette différence est constante quelle que soit la quantité de mouvement appliquée.

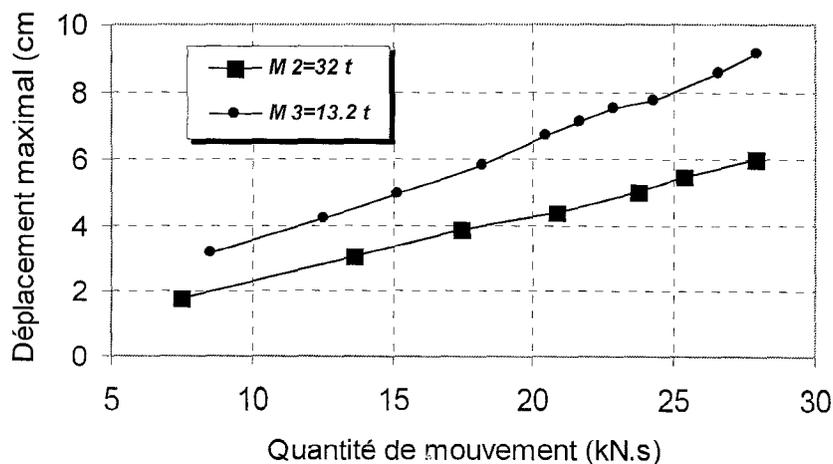


Figure 6: L'effet de la masse de superstructure sur le déplacement maximal
 Figure 6: Effect of pile cap mass on the maximum displacement

4. Modélisation numérique

Pour l'analyse de la réponse dynamique de pieux, plusieurs modèles ont été employés pour prendre en compte l'interaction pieu-sol. Parmi ces modèles, celui de Winkler est le plus simple et numériquement efficace. Le modèle de Matlock [8] et le modèle de Novak[10], souvent utilisés dans l'analyse de la réponse dynamique de pieux, peuvent être classés comme des modèles conventionnels de Winkler. Le modèle de Matlock est basé sur un système de ressort non linéaire indépendant de la fréquence et d'un amortisseur linéaire. La relation force-déplacement du ressort non linéaire est définie à partir des courbes P-y et les amortisseurs doivent modéliser l'amortissement radial. La force induite dans le modèle de Matlock est la somme des forces dues aux ressorts et aux amortisseurs.

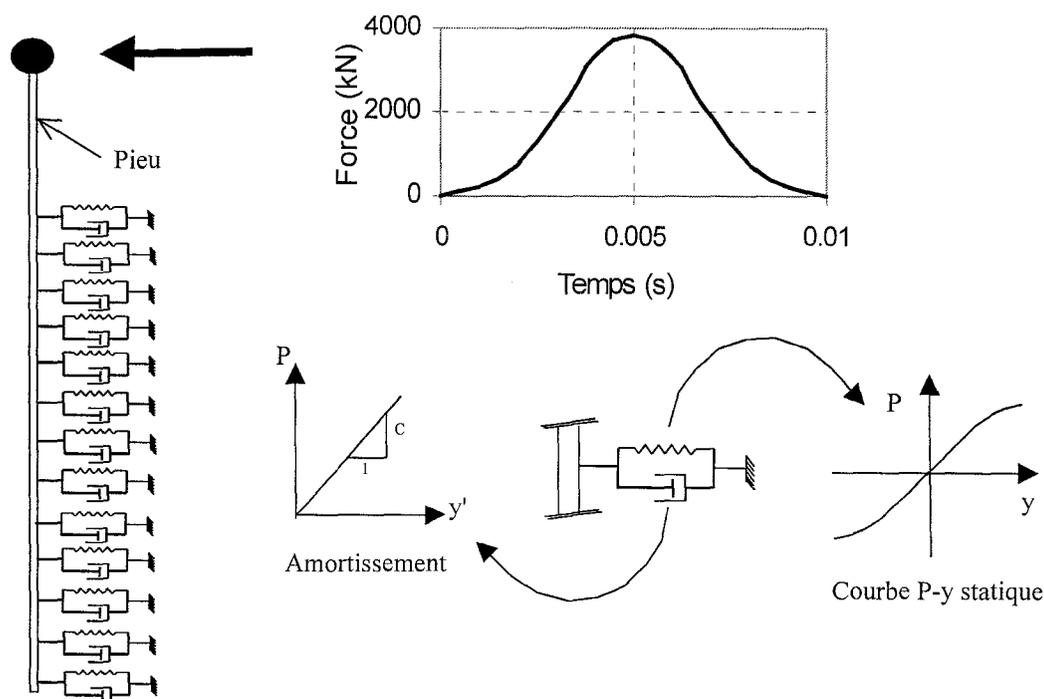


Figure 7: Schéma de la modélisation numérique
 Figure 7: Numerical modelling configuration

Des modélisations numériques de type Matlock ont été entreprises en utilisant le logiciel ANSYS ; elles sont illustrées à la figure 7. Dans ce modèle numérique les courbes P-y statiques, voir §4.1, tiennent compte du ressort non linéaire et de l'amortisseur linéaire. La valeur du coefficient d'amortissement a été déterminée par une analyse inverse afin d'obtenir une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques. Pour la masse dite de superstructure égale à 13 tonnes, et un impact défini tant en forme et en amplitude mesuré par le capteur de force (figure7), des simulations numériques ont été réalisées. Les résultats d'une analyse numérique sont montrés sur la figure 8. La comparaison du déplacement de la tête du pieu en fonction du temps entre les mesures expérimentales et les résultats numériques montre une bonne concordance. Un même accord est trouvé pour les moments fléchissants à différents profondeurs. Cette comparaison est montré pour la profondeur de $z=3.6\text{m}$ à partir de la surface du sol, figure 8.

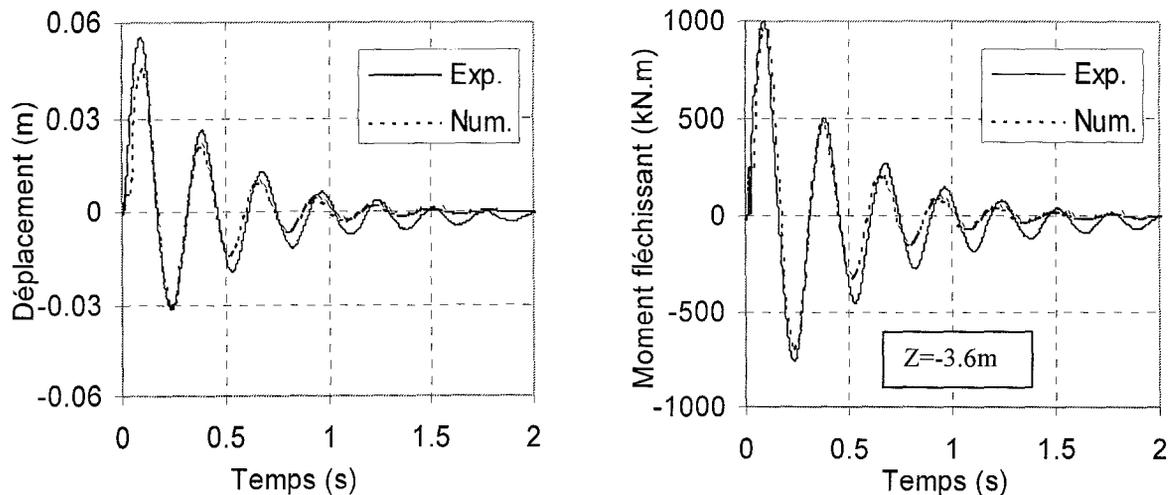


Figure 8: : Confrontation modèle numérique – données expérimentales
 Figure 8: Experimental data versus numerical results

5. Conclusions

Un système a été développé pour appliquer des impacts horizontaux pour des essais en centrifugeuse. Ce système peut produire des impacts répétitifs pour différentes amplitudes de force réglables.

A ce jour, un grand nombre d'essais a été réalisé. A partir des résultats obtenus et des observations faites, les principales conclusions concernent:

- la fréquence de résonance; elle augmente quand la masse dite de superstructure du pieu diminue,
- le déplacement maximal; en effet pour une quantité de mouvement donnée, le déplacement maximal augmente quand la masse dite de superstructure diminue. Ceci signifie que l'effet de la masse est très important sur le déplacement maximum du pieu,
- l'accumulation d'impacts identiques; il conduit à une augmentation de la fréquence de résonance.

Une bon concordance des résultats numériques et des données expérimentales a été observée.

Références

- [1]Garnier, J., 1990. Etudes sur modèles réduits centrifugés en Génie Civil, Premières Journées Génie Civil - Génie Côtier, Le Havre, pp. 101-119.
 [2]Grundhoff, T., Latotzke, J. & Laue, J., 1998. Investigations of vertical piles under horizontal impact. Centrifuge 98, pp.569-574.
 [3]Hajjalilue Bonab, M., Chazelas, J-L. and Levacher D., 2001. Simulation du comportement d'un pieu isolé soumis à un choc latéral en centrifugeuse. Proceedings of first international conference modeling and simulation in civil engineering: from practice to theory, Paris,
 [4]Hajjalilue Bonab, M., Chazelas, J-L. and Levacher D., 2002. Simulation of soil-pile interaction under lateral impact loads, Centrifuge 2002, St Johns, Canada, in printing.

- [5]Hajjalilue Bonab, M., Chazelas, J-L. and Levacher D., 2002. Behavior of pile foundation under impact lateral loads, Ninth international conference on piling and deep foundations, Nice, France, In printing
- [6]Janes, M. C., Bermingham, P.C. and Harvath, R.C., 1991. An innovative dynamic test method for piles, Proceedings of second international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamic, St. Louis, pp. 252-256.
- [7]Kramer, S., 1993. Seismic Response of foundation in soft soils. WSDOT Report WA-RD 264.1, Washington State University.
- [8]Matlock, H., Foo, S.H., and Bryant, L. L., 1978. Simulation of lateral pile behaviour, Proceedings on Earthquake engineering and soil dynamic, ASCE, Pasadena, California, July, pp. 600-619.
- [9]Mezazigh S., 1995. Étude expérimentale de pieux chargés latéralement : proximité d'un talus et effet de groupe, Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes.
- [10]Novak, M., 1975. Dynamic stiffness and damping of piles, Canadian geotechnical journal., NRC of Canada, Vol.11, No. 5, pp. 574-698.
- [11]Remaud, D., 1999. Pieux sous charges latérales: Etude expérimentale de l'effet de groupe, Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes.
- [12] Sieffert, J.G., Levacher, D., 1995. Étude de l'effet d'échelle de pieux battus en cours de centrifugation, Revue française de géotechnique, 10, pp.55-68
- [13]Ternet, O., 1999. Reconstitution et caractérisation des massifs de sable: Application aux essais en centrifugeuse et en chambre de calibration, Université de Caen, 184p.
- [14]Verdure, L., Levacher, D. and Garnier, J., 2002. Influence of the number of cycles on the behaviour of a single pile in sand under lateral loads, International journal of physical modelling in geotechnics, paper submitted to the journal.