

Étude du comportement des pieux d'une tour de grande hauteur : Instrumentation et modélisation numérique

Rosy Milane¹

¹ Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Lyon

RESUME Les fondations de « Silex² », une tour de grande hauteur à Lyon, ont été instrumentées à l'aide de différents capteurs pour étudier leur comportement. La déformation tout au long de ces pieux a été mesurée à l'aide de 3 différents types de capteurs. La contrainte appliquée en tête a été mesurée à l'aide de capteurs de pression totale. Un extensomètre multipoint a permis de suivre le tassement du sol caractérisé par des couches d'alluvions et de molasse. Ce travail d'instrumentation, complété par une campagne d'essais au laboratoire permet de caractériser le sol en place. D'autre part, des modèles numériques réalisés avec le logiciel FLAC3D ont été calibrés à la lumière de l'instrumentation et des essais de laboratoire afin de valider le choix final de paramètres et de lois de comportement.

Mots-clés Pieux, instrumentation, FLAC3D, Mohr-Coulomb, Plastic-Hardening

I. INTRODUCTION

Dans les ouvrages d'arts et les tours de grande hauteur soumis à des charges élevées, un suivi du comportement des fondations est très important. Sur le site de la tour « Silex² » de la Part-Dieu à Lyon, l'étude a été réalisée en mettant en place une instrumentation des pieux et du sol, dans le cadre du projet FONDASILEX financé par la région AURA et en collaboration entre le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et Antea Group. Cette instrumentation a permis par la suite de calibrer des modèles numériques réalisés avec FLAC3D.

Cet article décrit l'instrumentation mise en place ainsi que quelques résultats numériques.

II. Description du projet

Le projet se situe dans le quartier de la Part-Dieu de Lyon, à 1 km du Rhône un des plus grands fleuves d'Europe. Il consiste à réhabiliter la tour EDF existante et construire une nouvelle tour « Silex² » de 135 m de hauteur. La tour Silex² est fondée sur 10 appuis de 2 pieux chacun surmontés par une structure en béton armé qui transfère les charges de la tour aux pieux. Le plan des fondations est présenté dans la Figure 1.

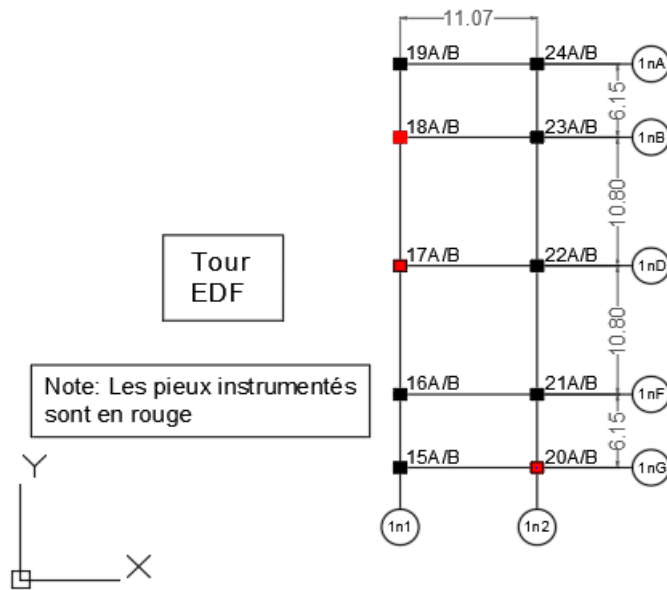


FIGURE 1. Plan des fondations de « Silex² »

La géologie lyonnaise est marquée en surface par la présence d’une couche d’alluvions fluviales du Rhône qui sont constituées de sables et de graviers très perméables avec quelques lentilles de limon ou de sables. Cette couche surmonte une couche plus profonde et plus épaisse de molasse du miocène. Celle-ci est formée par des sables fins gris jaunâtres plus ou moins grésifiés et représente le substratum de la plaine lyonnaise en rive gauche du Rhône. Le Tableau 1 présente la lithologie au droit de la tour Silex², déterminée à l’aide de plusieurs sondages.

TABLEAU 1. Lithologie retenue au droit de Silex²

Couche	Épaisseur (m)	Toit de la couche (m NGF)
Remblai	3,5	168
Alluvions 1	6,75	164,5
Alluvions 2	4	157,75
Alluvions 3	5,75	153,75
Molasse	>50	148

Les pieux de la tour Silex² traversent les trois couches d’alluvions et sont ancrés dans la molasse.

II. Instrumentation

Dunnicliff (1988) a présenté une approche pour planifier tout programme d’instrumentation géotechnique. Elle commence par la définition des conditions du projet et du but de l’instrumentation. Ensuite, il faut choisir les paramètres à contrôler et l’ampleur des variations prévues avant de choisir les capteurs à utiliser et les endroits dans lesquels ils seront implantés.

A. Instrumentation des pieux

En prenant en considération ce qui précède, les six pieux en rouge dans la Figure 1 ont été instrumentés pour mesurer le profil de déformation tout au long ainsi que la contrainte appliquée en tête. Pour assurer la redondance, 3 types de capteurs ont été installés :

- 14 extensomètres à corde vibrante (ECV) : ils sont petits, stables à long terme, ne sont pas influencés par le changement climatique et peuvent être connectés via des câbles longs sans affecter les résultats (Bica et al., 2014; Hayes and Simmonds, 2002)
- 36 jauges de déformation à résistance électrique : elles sont petites, résistent à l'humidité mais sont instables à long terme
- 6 fibres optiques qui permettent de mesurer la déformation répartie sur tout le pieu. Ces fibres sont interrogées à l'aide d'une centrale optique (Odisi 6100) qui utilise la technologie de la réflectométrie par rétrodiffusion Rayleigh

Tous ces capteurs sont compatibles avec le béton et supportent une large gamme de température. La Figure 2 est un ensemble de photos qui ont été prises sur le chantier mettant en évidence les capteurs précités.



FIGURE 2. Photos prises sur chantier (à gauche, une jauge de déformation, au milieu, un extensomètre à corde vibrante et à droite, une fibre optique)

Pour mesurer la contrainte en tête des pieux, 18 capteurs de pression totale (CPT) compatibles avec le béton ont été posés après recépage des pieux au niveau de l'arase supérieure comme le montre la Figure 3. Trois capteurs ont été installés par pieu vu le grand diamètre de ces fondations. Ayant un signal de sortie (4-20 mA), la longueur des câbles n'affecte pas les mesures.



FIGURE 3. Capteur de pression totale installé sur une tête de pieu après recépage

B. Instrumentation du sol

Un extensomètre multipoint est installé dans un forage sonique de 35 m de profondeur pour mesurer le tassement du sol. La tête est équipée de 6 capteurs de déplacement connectés à 6 points

d’ancrage fixés dans les alluvions et la molasse à 6 niveaux différents (2, 8, 14, 20, 27 et 35 m à partir de la tête) et donc mesurent le tassement relatif entre la tête et le point d’ancrage le plus bas.

C. Analyse des résultats de l’instrumentation

La fréquence d’acquisition des mesures doit être suffisante pour pouvoir détecter les événements importants et, en même temps, ne doit pas alourdir le programme. Briançon et al. (2016) proposent d’utiliser 12 à 24 mesures par jour dans les applications en géotechnique.

La valeur zéro de tous les capteurs correspond au début de la construction de la tour en acier en septembre 2019. Les mesures ont été collectées entre cette date et le moment où la charpente métallique est entièrement construite en septembre 2020.

Dans ce paragraphe, seules les mesures du pieu 17A seront présentées. D’une part, comme trois capteurs de pression totale étaient installés sur chaque pieu, la pression moyenne a été calculée, ce qui a permis de déterminer la charge moyenne après multiplication par la section du pieu. La charge mesurée en tête du pieu 17A a été comparée avec la charge théorique dans la Figure 4. La valeur maximale mesurée est de 2 960 kN le 3 septembre 2020.

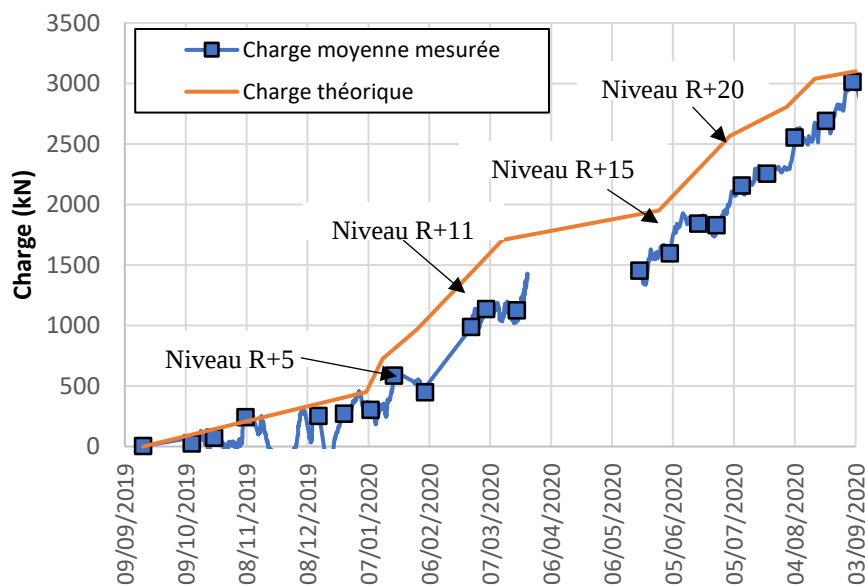


FIGURE 4. Comparaison entre charges mesurées et théoriques en tête du pieu 17A

La déformation tout au long du pieu a été enregistrée pendant trois dates différentes. Puisque la valeur zéro des mesures par fibres optiques correspond au 26/2/20, toutes les déformations sont calculées par rapport à celle-ci. Par ailleurs, tous les capteurs sont sensibles à la température ce qui nous a emmené à faire une compensation. La température dans les pieux a été mesurée à l’aide des extensomètres à corde vibrante. Les valeurs corrigées sont présentées dans la Figure 5.

Les valeurs de déformation négatives indiquent des raccourcissements liés à de la compression. On peut noter que les différents capteurs donnent des valeurs du même ordre de grandeur, ce qui montre le bon fonctionnement des capteurs. Ces courbes présentent aussi un pic entre 4 et 5.5 m qui peut être causé par du frottement négatif ou un changement du diamètre du pieu. La

déformation maximale détectée était d'environ de $80 \mu\epsilon$ ce qui est considéré comme relativement faible mais aussi conforme à la charge mesurée à l'aide des CPT et à la charge théorique.

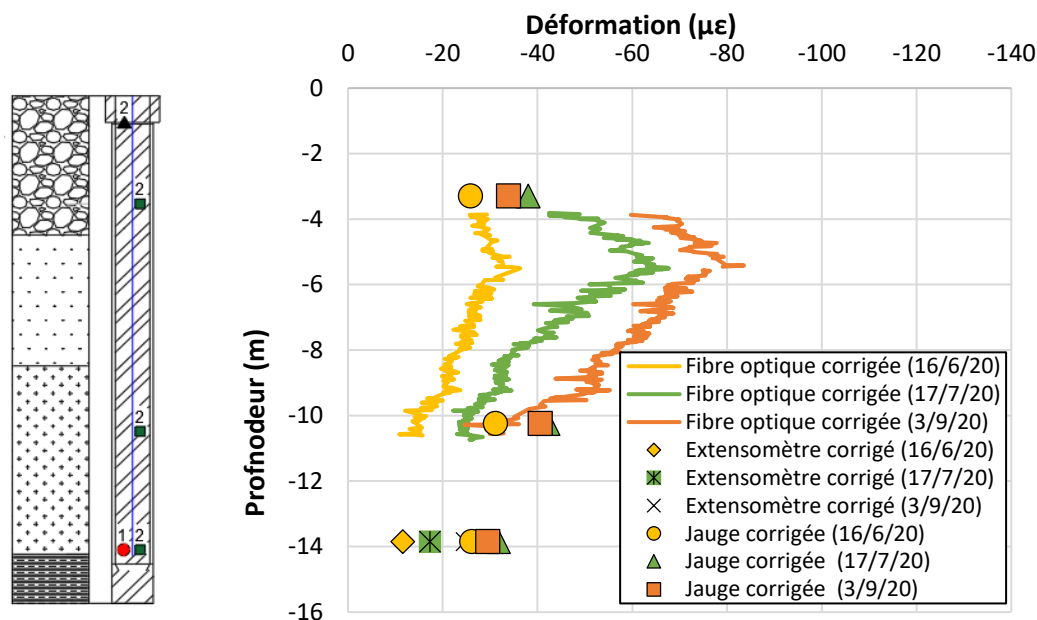


FIGURE 5. Profil de déformation mesurée dans le pieu 17A

Le tassement du sol a été mesuré entre le début et la fin de la construction de la charpente métallique. Le tassement maximum est de l'ordre de 1,6 mm, mesuré entre 0 et 8 m de profondeur comme le montre la Figure 6.

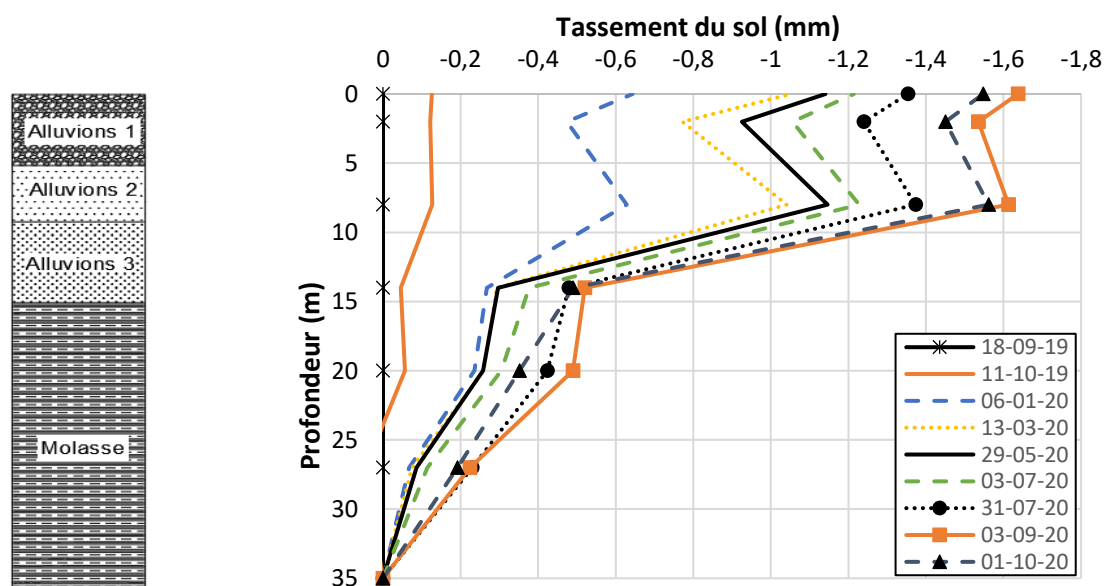


FIGURE 6. Profil de tassement du sol mesuré à différentes dates

Toutefois, à des profondeurs plus importantes, le tassement est inférieur à 0,5 mm. Ces mesures de tassement sont cohérentes avec la faible charge appliquée et avec le frottement négatif mesuré par la fibre optique sur les premiers mètres de sol. Il convient de noter que sur le site de la Part-Dieu, plusieurs structures ont été construites et démolies avant la tour Silex², ce qui induit un effet non négligeable sur le comportement du sol et par suite sur les mesures prises.

III. Modélisation numérique

Afin de mieux comprendre le comportement des pieux dans les alluvions et la molasse, une modélisation numérique dans FLAC3D qui utilise la méthode des différences finies a été adoptée. Elle a permis d'observer l'effet qu'a la variation des paramètres et des lois de comportement sur la réponse des pieux et du sol. Plusieurs modèles ont été testés ayant la géométrie et le maillage présentés dans la Figure 7.

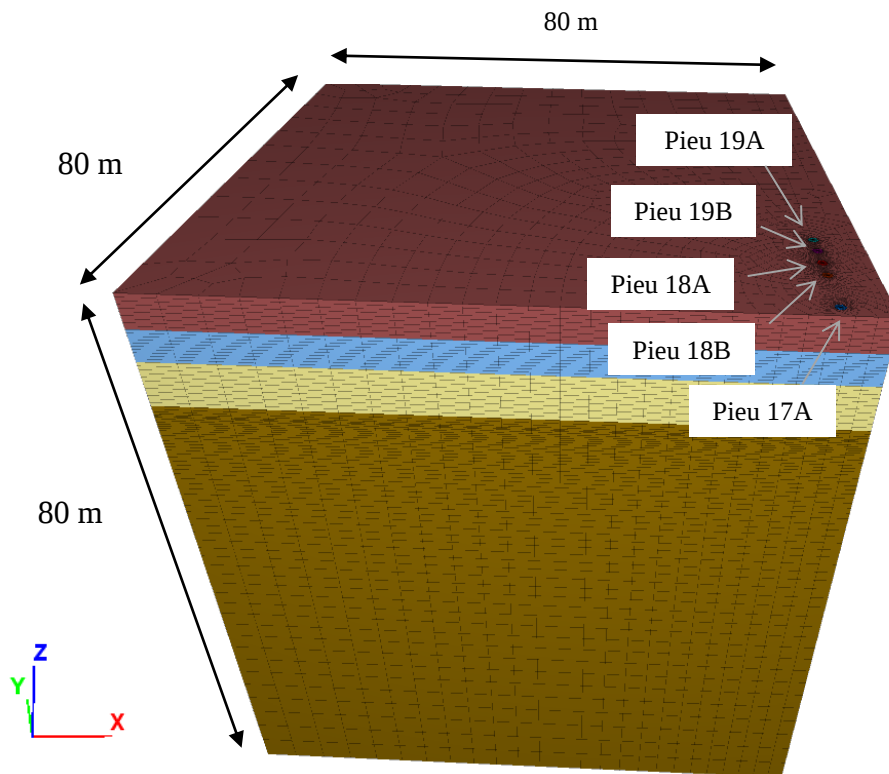


FIGURE 7. Modèle global sur FLAC3D

Deux modèles seront présentés dans cette étude. Les lois de comportement et les paramètres sont résumés dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Paramètres retenus pour les modèles numériques

		Modèle global 1	Modèle global 2
Alluvions	Loi	Loi élastique parfaitement plastique avec un critère de rupture de Mohr-Coulomb	
	Paramètres	• $c = 5 \text{ kPa} / \phi = 35^\circ / \psi = 5^\circ$ • Module d'Young déterminé à l'aide des modules pressiométriques des alluvions : $E = 245 \text{ MPa}$, 32 MPa et 264 MPa (Pour les trois couches d'alluvions respectivement)	
Molasse	Loi	Loi élastique parfaitement plastique avec un critère de rupture de Mohr-Coulomb	Plastic Hardening Model
	Paramètres	• $c = 25 \text{ kPa} / \phi = 35^\circ / \psi = 5^\circ$ • $E = 375 \text{ MPa}$ (fût) $E = 326 \text{ MPa}$ (pointe)	Paramètres calibrés à l'aide d'essais triaxiaux et œdométriques : • $c = 25 \text{ kPa} / \phi = 35^\circ / \psi = 5^\circ$ • $E_{50}^{\text{ref}} = 12,46 \text{ MPa}$ • $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 17 \text{ MPa}$ • $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 250 \text{ MPa}$ • $R_f = 0,8 / m = 0,5 / \text{OCR} = 4$
Béton	Loi	Loi élastique linéaire	
	Paramètres	$E_p = 34,5 \text{ GPa}$	

Dans cette analyse, les charges appliquées sur la tête des pieux correspondent à celles mesurées à l'aide des CPT le 3/9/20 (2960, 2345 et 2750 kN pour les pieux 17, 18 and 19 respectivement). On a pu remarquer que la plus grande partie du sol reste dans le domaine élastique à cause de la faible charge.

La figure 8 présente une comparaison entre la déformation des pieux dans ces modèles numériques et celle obtenue à travers l'instrumentation entre le 26/2/20 et le 3/9/20. Les courbes montrent la même plage de déformation qui est compatible avec la charge appliquée sans pouvoir représenter le frottement négatif observé expérimentalement le long du pieu ce qui paraît très normal vu que le sol adjacent aux pieux n'est pas chargé suffisamment.

Par ailleurs, le frottement latéral mobilisé tout le long du pieu dans le modèle numérique est très faible par rapport au frottement observé expérimentalement. Une simple comparaison entre les 2 méthodes montre une valeur de 460 kN environ dans FLAC3D sur la section de pieu (5.5 – 10.5 m) alors que la force de frottement mobilisée réellement est de 1970 kN. Une cause de cette différence peut être l'attribution à l'interface d'une loi simplificatrice incapable de montrer le frottement réel. Cette étude nous amène à conclure la validité des paramètres et des lois de comportement choisis dans les modèles numériques précédents sous réserve que l'étude sera poursuivie pour de plus grandes charges.

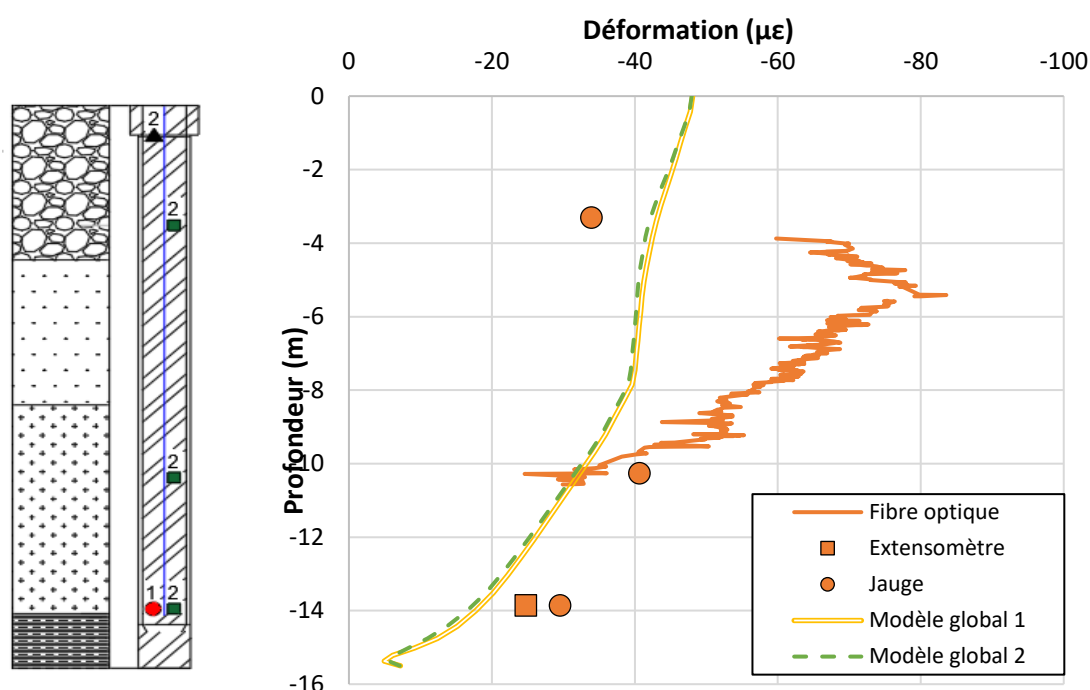


FIGURE 8. Comparaison entre les profils de déformation mesurée et obtenue dans FLAC3D

IV. Conclusion

Cette étude montre l'instrumentation du sol et des pieux de la tour « Silex² », réalisée dans le cadre du projet « FONDASILEX » financé par la région « AURA ». Les résultats de l'instrumentation ont permis de calibrer un modèle numérique en différences finies sur FLAC3D en utilisant aussi des résultats d'essais effectués in situ et au laboratoire. Une étude du comportement à long terme de la structure et du sol permettra de valider ou non les paramètres des sols déterminés expérimentalement.

REFERENCES

- Bica, A. VD, Prezzi, M., Seo, H., Salgado, R., Kim, D., 2014. Instrumentation and axial load testing of displacement piles, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering. pp. 238–252. <https://doi.org/10.1680/geng.12.00080>
- Briançon, L., Cazeaudumec, B., Pincet, B., 2016. Auscultation géotechnique. Tech. l'ingénieur Géotechnique base docum.
- Dunncliff, J., 1988. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons, 1988. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(91\)90045-m](https://doi.org/10.1016/0013-7952(91)90045-m)
- Hayes, J., Simmonds, T., 2002. Interpreting strain measurements from load tests in bored piles, in: Proceedings of the 9th International Conference on Piling and Deep Foundations, Nice, France. pp. 663–669.