

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES PIEUX D'UNE TOUR DE GRANDE HAUTEUR : INSTRUMENTATION ET MODÉLISATION NUMÉRIQUE

STUDY OF THE BEHAVIOR OF PILES FOUNDATIONS OF A HIGH-RISE BUILDING: INSTRUMENTATION AND NUMERICAL MODELING

Rosy Milane¹, Laurent Briançon², Ali Daouadji³, Stéphane Grange⁴, Pierre Cazes⁵

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

² Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Lyon

³ Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Lyon

⁴ Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Lyon

⁵ Antea Group, 109 Rue des Mercières, F-69140, Rillieux-la-Pape

RÉSUMÉ - Les fondations de « Silex2 », une tour de grande hauteur à Lyon, ont été instrumentées à l'aide de différents capteurs pour étudier leur comportement, étant soumises à de charges importantes. 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 et de calibrer des modèles numériques mis en œuvre.

ABSTRACT - The pile foundations of « Silex2 », a high-rise building in Lyon, France, were instrumented during their construction using several types of sensors, in order to study their behavior under high loads. A fiberglass rod extensometer was also installed to monitor the settlement of the soil. A layer of fluvial alluviums overlying a thick layer of molasse characterizes the soil in Lyon. This work along with laboratory tests helped to define the properties of the soil and calibrate numerical model we propose

1. 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 avec le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et Antea Group.

Cet article décrit l'instrumentation mise en place ainsi que quelques essais de caractérisation du sol. Des essais triaxiaux CU+u ont permis de calibrer les modélisations réalisées sur Plaxis2D.

2. Description du projet

2.1. Localisation 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. Les deux tours sont connectées à l'aide d'une liaison structurelle au niveau R+21, ce qui engendre des efforts supplémentaires sur les fondations de la tour. Le

site se trouve dans une zone sismique 2 à faible risque et un contre-calcul sur Plaxis 3D montre que les charges sismiques sont couvertes par les charges de vent.

2.2. Lithologie

La géologie lyonnaise est marquée par la présence de quatre formations géologiques : formations d'âge primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire. La molasse et les alluvions sont qualifiées respectivement de formations d'âge tertiaires et quaternaires. Les alluvions fluviales du Rhône sont constituées de sables et graviers très perméables avec quelques lentilles de limon ou de sables. La nappe phréatique qui les baigne est en relation avec le Rhône et la Saône. La molasse marine du miocène représente le substratum de la plaine lyonnaise en rive gauche du Rhône. Elle est formée soit par des sables fins nommés sables de Saint-Fons, soit par des cailloutis argilo-ferrugineux dits « du Jardin des plantes » (Laréol, 1975). Des relevés piézométriques effectués par Antea Group à proximité du site nous permettent d'estimer un niveau de la nappe à une hauteur de 161,9 m NGF.

Le Tableau 1 présente la lithologie au droit de la tour Silex², déterminée à l'aide de plusieurs sondages.

Tableau 1. Lithologie retenue pour le dimensionnement des fondations profondes conforme au rapport de mission G2 PRO

	Épaisseur (m)	Toit de la couche (NGF)	Module pressiométrique E_M (MPa)	Module de déformation E (MPa)	Pression limite p^* (MPa)	α
Remblai	3,5	168	4,3		0,4	0,33
Alluvions 1	6,75	164,5	62	135	4,5	0,33
Alluvions 2	4	157,75	8	20	1,4	0,33
Alluvions 3	5,75	153,75	67	150	4,7	0,33
Molasse	>10m	148	95	300	4,8	0,5

2.3. Plan des fondations

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. Ayant une profondeur d'environ 16 m, tous les pieux sont ancrés dans la molasse. Le plan des fondations est présenté dans la Figure 1.

2.4. Descente de charge

La portance de chaque fondation est estimée sous descentes de charges verticales uniquement conformément à la NF P 94-262. Plusieurs combinaisons d'actions ont été étudiées pour la configuration de « tour couplée », qui prend en compte la connexion entre les deux tours, ou bien la configuration de « tour seule ». La plus défavorable est ELS CARA 11 VENT direction X. Les charges seront présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Descente de charge sur les pieux

ELS CARA 11 VENT - Direction X						
Pieu (A ou B)	Calcul kmax			Calcul kmin		
	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
15	-91,2	6,6	-7546,6	-92	-42,7	-7467,4
16	-13,6	15,2	-7395,3	-28,9	-34,2	-7281,3
17	-23,2	32,8	-8190,2	-9,2	23,9	-8193,9
18	-14,9	15,7	-6988,9	-16,4	17,1	-6935,8
19	-71,8	25,9	-7237,3	-81,7	31,7	-7091,8
20	-3,1	-76,8	-5986,3	-13,7	-75,8	-6510,3
21	-27,6	-0,3	-6540,2	-30	-48,2	-6460,9
22	-25,6	31,8	-7286	-10,2	15,3	-7189,2
23	-27,3	31,6	-6126	-25,8	46,1	-6078,8
24	-50,1	48,5	-5662,5	-46,5	59,4	-5952,5

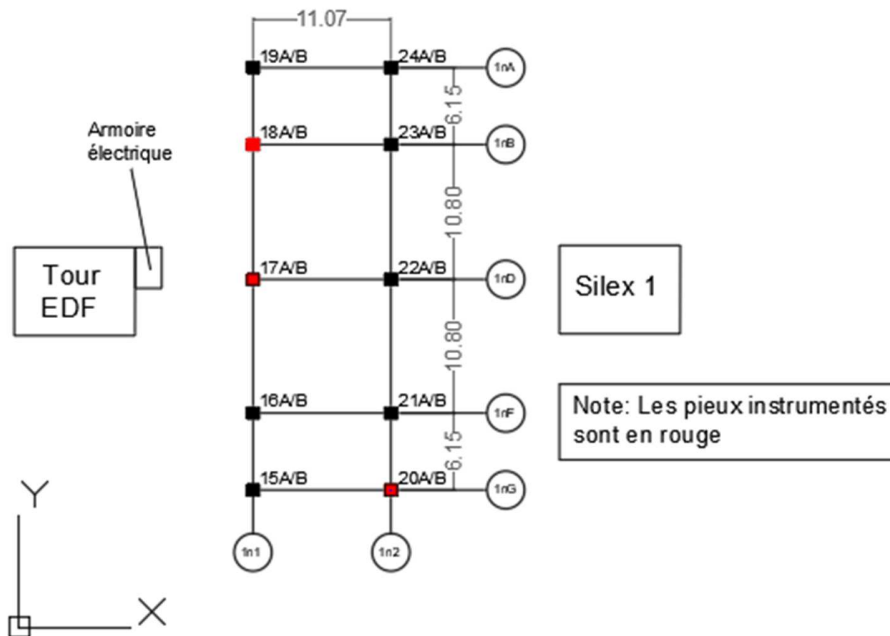


Figure 1. Plan des fondations de Silex²

3. Instrumentation

3.1. Étude bibliographique

Pour établir un programme d'auscultation géotechnique, il faut d'une part définir les conditions du projet et le 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 (Paikowsky et Hajduk, 2004). D'autre part, plusieurs capteurs du même type doivent être implantés dans le chantier pour limiter le risque de perdre l'information si un des capteurs venait à être détruit. De même, en raison de redondance, des capteurs de

technologie différentes mesurant la même variable peuvent être utilisés pour avoir des mesures plus fiables et plus précises.

En prenant en considération ce qui précède, le plan d'auscultation a été choisi et sera présenté dans ce qui suit.

3.2. Plan de l'instrumentation

3.2.1. Instrumentation des pieux

Sur la base de ce qui précède, six pieux ont été instrumentés pour mesurer le profil de déformation tout au long ainsi que la contrainte appliquée en tête. Ces pieux sont indiqués en rouge dans la Figure 1.

Pour assurer la redondance, 3 types de capteurs ont été choisis pour mesurer la déformation des pieux dont 14 extensomètres à corde vibrante (ECV), 36 jauges de déformation ainsi qu'une fibre optique dans chaque pieu instrumenté. La Figure 2 est un ensemble de photos qui ont été prises sur le chantier mettant en évidence les capteurs précités.

Les ECV sont petits, stables à long terme sous charge statique, peuvent être connectés via des câbles longs sans affecter les résultats et ils ne sont pas influencés par le changement climatique (Bica et al., 2013 et Hayes and Simmonds, 2002). Outre la déformation qu'ils mesurent à travers la variation de fréquence, ces capteurs nous informent sur la température du béton. Les jauges de déformation classiques mesurent la déformation des pieux par variation de résistance.

Ces deux types de capteurs ont été positionnés sur la cage d'armature des pieux aux niveaux 5 m, 12 m et 15,5 m, au niveau des alluvions et de la molasse.



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)

Une instrumentation spécifique est faite dans ce projet, en installant des fibres optiques sur la cage d'armature des pieux et qui servent à mesurer leur déformation. Le principe de fonctionnement se base sur le fait qu'une onde lumineuse incidente, est rétrodiffusée quand elle rencontre les impuretés dues à la déformation des fibres. Rayleigh, Brillouin et Raman sont les trois types de rétrodiffusion possibles et ils sont détaillés par Sikali (2004). Vu la longueur maximale des pieux et la résolution spatiale nécessaire, une rétrodiffusion Rayleigh se basant sur l'OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) a été choisie (Eickhoff, 1981 et Leung et al., 2013). Au lieu de lire l'intensité du signal de Rayleigh rétrodiffusé, l'OFDR mesure les franges d'interférence de la lumière de Rayleigh diffusée par une source laser accordable et une fibre statique de référence dans le domaine fréquentiel. Au moyen de la transformation de Fourier Inverse, l'amplitude et la phase dans le domaine fréquentiel sont converties dans le domaine temporel/spatial.

Dans ce projet, 6 fibres optiques dans les pieux et une dans le radier ont été installées. Pour mesurer la contrainte en tête des pieux, 18 capteurs de pression totale compatibles avec béton ont été posés après recépage des pieux au niveau de l'arase supérieure comme le

montre la Figure 3. 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

3.2.2. Instrumentation du sol

Pour mesurer le tassement du sol, un extensomètre multipoint est installé dans un forage sonique de 35 m de profondeur. La tête est équipée de 6 capteurs de déplacement qui mesurent jusqu'à 60 mm de déplacement. Ces potentiomètres sont connectés à 6 points d'ancrages 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. À savoir que le tassement du sol prévu est de 25 mm d'après modélisation menée sur la base d'une rétro-analyse avec la tour oxygène construite dans le même quartier.

Les caractéristiques des capteurs sont résumées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques des capteurs utilisés

	Capteurs de pression totale		Extensomètres à corde vibrante	Jauges de déformation	Potentiomètres
Fournisseur	GLOTZL	GLOTZL	SISGEO	KYOWA	GLOTZL
Modèle	E Φ 30 AI 50	E Φ 30 AI 150	0VK4000VS00	KFGS-5-120-C1-11	GWLO 22/60
Nombre	14	4	14	36	6
Gamme de mesure	0-50 bars	0-150 bars	3000 $\mu\epsilon$ ($\pm 1500 \mu\epsilon$) 520-1020 Hz		0 - 60 mm
Température	-25°C ... + 80°C	5°C ... + 60°C	-20 °C ...+ 80°C		-30°C ...+ 70°C
Résolution	< à $\pm 1\%$ f.s.	< à $\pm 1\%$ f.s.	$\pm 0.5\%$ f.s.	-	< à $\pm 1\%$ f.s.
Autres caractéristiques	surcharge: 20% Output signal: 4-20 mA		Longueur de câble maximale : 1000 m	Résistance 119.8 Ω $\pm 0.2\%$	

f.s. : pleine échelle

3.3. Systèmes d'acquisition

Deux centrales d'acquisition, illustrées en Figure 4, ont servi pour la collecte des mesures : une Datataker DT85KLM3-4 pour les extensomètres à corde vibrante, les capteurs de pression totale, les potentiomètres et les jauges de déformation et une centrale optique Odisi 6100 pour les fibres optiques.



Figure 4. À gauche, la centrale Datataker et à droite, la centrale optique

La fréquence des mesures dépend des activités qui ont lieu sur site. Elle doit être suffisante pour éviter de manquer certains événements mais aussi pour ne pas surcharger les systèmes d'acquisition (Dunnicliff, 1994).

3.4. Retour d'expérience sur l'installation des capteurs

L'instrumentation a été conçue pour permettre une redondance spatiale et technologique, c'est-à-dire que de nombreux capteurs de différentes technologies ont été installés. Cette redondance permet de disposer d'un nombre suffisant de mesures malgré la perte de quelques capteurs lors de leur installation et des phases suivantes. Citons par exemple que les câbles de 2 capteurs ont été coupés à cause du soulèvement imprévu de la cage d'armature du massif qui surmonte les deux pieux alors que ces câbles étaient attachés aux pieux. Par ailleurs, des fibres optiques prévues au départ dans le radier n'ont pas été installées à cause d'un changement dans le planning de construction, et d'autres ont été coupées par inattention en phase travaux.

D'autre part, les connexions des fibres optiques n'ont pas pu survivre aux conditions extrêmes de température et de pollution du chantier et donc des travaux de soudure ont été nécessaires pour remplacer les connectiques. Cette instrumentation nous a appris que même si toutes les précautions ont été prises lors de la pose des capteurs avec l'entreprise de fondations, les entreprises de Génie Civil qui sont intervenues ensuite n'ont pas été suffisamment sensibilisées à notre sujet.

Jusqu'à présent la charge apportée par la construction reste inférieure à la charge apportée par le bâtiment déconstruit. Nous pouvons juste constater le bon fonctionnement des capteurs installés et non dégradés en attendant des charges supérieures qui permettront d'analyser le comportement des fondations.

4. Essais expérimentaux

Des essais de laboratoire ont accompagné l'instrumentation dans le but de déterminer les paramètres géotechniques des alluvions et de la molasse, tels que des analyses granulométriques, des essais œdométriques et des essais triaxiaux CU+u. Les résultats de ces derniers seront présentés dans ce qui suit.

4.1. Essai triaxial sur la molasse CU+u

Des essais triaxiaux CU+u sont réalisés par Antea Group sur des échantillons intacts de molasse provenant d'une profondeur entre 18 et 23 m. Les courbes expérimentales obtenues, dont une est présentée en Figure 5, ont permis de déterminer les paramètres du modèle HSM (Hardening Soil Model), qui est un modèle de comportement élastoplastique, décrivant un sol

dont le module de déformation décroît tout en développant des déformations plastiques irréversibles (Schanz et al., 1999). La dépendance du module de déformation vis-à-vis de la contrainte est décrite par le paramètre m et le rapport R_f entre le déviateur asymptotique et celui de rupture.

L'analyse des essais permet d'estimer une cohésion nulle et un angle de frottement égal à 43° pour le premier essai et 36° pour le second.

Le module sécant non drainé est calculé à 50% et le module drainé est alors déduit en utilisant la relation (1)

$$Eu = E' \frac{1+\nu_u}{1+\nu'} \quad (1)$$

Ensuite, ces essais ont été modélisés numériquement avec le module « SoilTest » de Plaxis 2D ce qui a permis de calculer la valeur de R_f et de m .

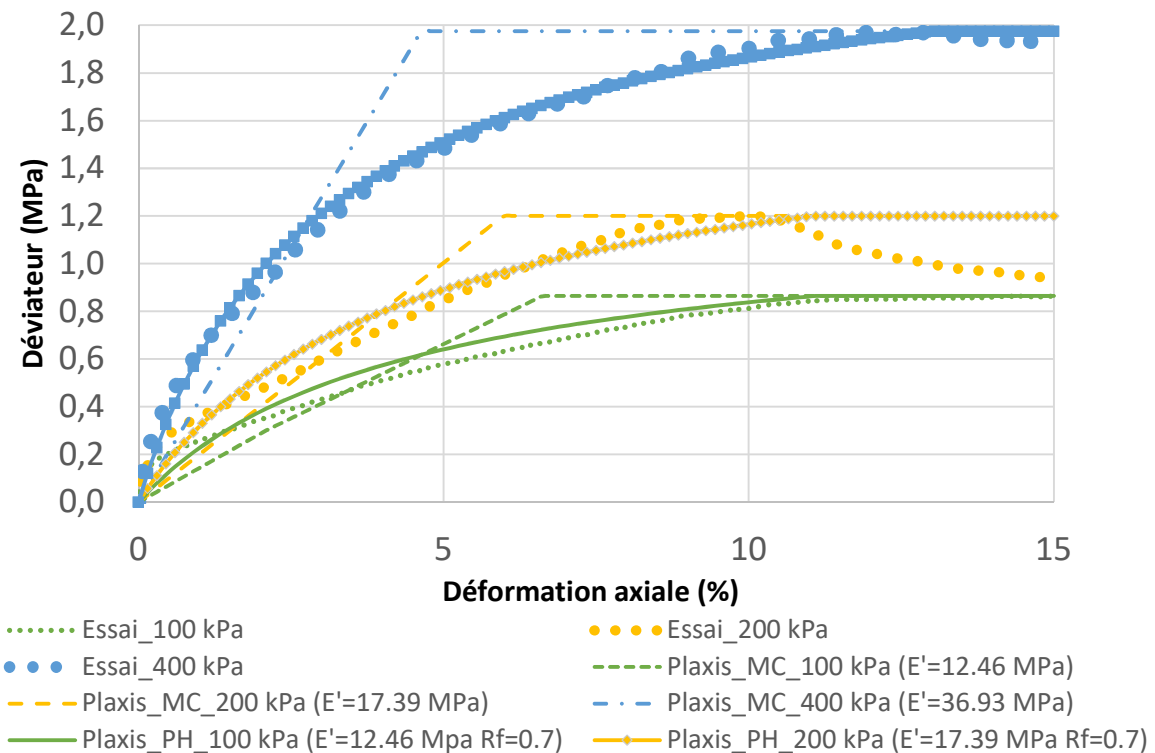


Figure 5. Graphique qui montre les différents essais triaxiaux expérimentaux et numériques réalisés sur l'échantillon EC_18_19

5. Conclusion

Cette étude nous montre que la réussite de l'instrumentation d'un ouvrage dépend de plusieurs critères importants :

- le plan d'auscultation,
- la coordination avec les entreprises de construction,
- la précaution portée à la pose des capteurs durant l'installation,
- la collecte des mesures et leur bonne interprétation.

Par ailleurs, les résultats de l'instrumentation permettront dans nos travaux de calibrer un modèle numérique en différences finies sur FLAC 3D en utilisant aussi les résultats des essais effectués in situ et au laboratoire. Ce travail est en cours.

6. Remerciements

Ce travail est financé par la région AURA dans le cadre du projet Pack Ambition 2017. Les auteurs remercient « Covivio » le maître d'ouvrage ainsi que « Builders and Partners » et « Eiffage construction confluence » pour toute l'aide qu'ils ont fourni pendant et après l'instrumentation.

7. Références

Bica A., Prezzi M., Seo H., Salgado R. and Kim D. (2013). Instrumentation and Axial Load Testing of Displacement Piles. Lyles School of Civil Engineering Faculty Publications.

Dunnicliff J. (1994). Geotechnical instrumentation for monitored field performance. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-00546-9.

Eickhoff W. and Ulrich R. (1981). Optical frequency-domain reflectometry in single-mode fibers. Appl. Phys. Lett., vol. 39 (9), pp. 693–695.

Hayes J. and Simmonds T. (2002). Interpreting strain measurements from load tests in bored piles. Proceedings of the ninth international conference on piling and deep foundation, Nice, France.

Laréal P. (1975) Sols de la région lyonnaise : prévision de leur comportement mécanique à l'aide d'essais in situ et en vraie grandeur. Thèse Sci. Univ. Claude-Bernard. Lyon, 253 p.

Leung C.K.Y., Wan K.T. Inaudi D., Bao X., Habel W., Zhou Z., Ou J., Ghandehari M., Wu H.C. and Imai M. (2013). Optical fiber sensors for civil engineering applications. Mater. Struct., vol. 48, pp. 871-906.

Paikowsky S. and Hajduk E. (2004). Design and Construction of Three Instrumented Test Piles to Examine Time Dependent Pile Capacity Gain. Geotechnical Testing Journal, ASTM 27(6) pp. 1-17

Schanz T., Vermeer P., Bonier P. (1999) Formulation and verification of the Hardening Soil Model. Proceeding of the Plaxis Symposium, Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Brinkgreve, R. B. J. (ed.), pp. 281–290. Rotterdam: Balkema.

Sikali Mamdem Y., (2012) Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : Séparation de la dépendance à la température et à la déformation. Thèse soutenue à Telecom ParisTech.