# Effet du creusement au tunnelier sur les fondations profondes : comparaison entre cordes vibrantes et fibres optiques

# *Effect of tunnel excavation on deep foundations: comparison between strain gauges and optical fibers measurements*

Wassim MOHAMAD<sup>1</sup>, Emmanuel BOURGEOIS<sup>1</sup>, Alain LE KOUBY<sup>1</sup>, Fabien SZYMKIEWICZ<sup>1</sup>, Agathe MICHALSKI<sup>2</sup>, Denis BRANQUE<sup>3</sup>, Nicolas BERTHOZ<sup>2</sup>, Charles KREZIAK<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77454 Marne-la-Vallée, France <sup>2</sup>Centre d'Etudes des Tunnels, F-69500 Bron, France <sup>3</sup>ENTPE, LTDS, F-69518 Vaulx-en-Velin, France <sup>4</sup>Société du Grand Paris, F-93200 Saint Denis, France

**RÉSUMÉ –** Trois pieux instrumentés par des cordes vibrantes et des fibres optiques ont été installés au-dessus du tracé d'un tunnel avant sa construction afin de quantifier l'effet du creusement sur les pieux. Cette communication présente les détails de l'instrumentation des pieux, le traitement des données, les efforts internes après chargement et creusement et la comparaison entre les deux systèmes de mesures.

**ABSTRACT** – Three piles instrumented with strain gauges and optical fibre cables have been installed on the route of a future tunnel in order to better understand the effect of tunnelling on pile foundations. We present the details of the pile instrumentation, data processing, normal forces and bending moments after piles loading and tunnel excavation and a comparison between the two measurement setups.

# 1 Introduction

Les ouvrages de génie civil font souvent l'objet d'une surveillance continue afin de s'assurer de leur bon fonctionnement pendant leur construction et leur exploitation. Depuis quelques années, les capteurs à fibres optiques sont de plus en plus utilisés pour surveiller ces ouvrages en complément des capteurs traditionnels. La fibre présente de nombreux avantages : elle est peu intrusive, peu sensible aux perturbations électromagnétiques et quasi inerte chimiquement (Barrias, et al., 2016). Elle est souvent utilisée pour des mesures de déformations à haute résolution spatiale (permettant la détection précise d'anomalies comme des fissures) à cœur ou en surface des structures ou pour suivre le vieillissement des structures de génie civil (ponts, tunnels, etc.) et des réseaux de transports (lignes ferroviaires).

La prévision de l'influence du creusement pressurisé des tunnels sur des pieux est un problème complexe : il est difficile d'estimer les déplacements induits par le tunnelier dans le terrain en raison du caractère tridimensionnel du problème, de la complexité du processus de creusement et de la complexité du comportement mécanique des sols. Cela peut justifier de suivre le comportement des pieux par des capteurs de déformation pendant la période de passage du tunnelier.

Cette communication présente une étude expérimentale en vraie grandeur de l'effet du creusement d'un tunnel sur des pieux isolés, réalisée lors de la construction de la nouvelle ligne 16 du Grand Paris Express, à Aulnay-sous-Bois, dans le cadre du projet TULIP. Ce dernier comporte l'instrumentation du sol et la réalisation de trois pieux installés à proximité du tunnel, à des positions choisies en considérant les zones d'influence géotechnique proposées par (Kaalberg, et al., 2005) et (Selemetas, et al., 2005) (Figure 1a). Les trois pieux P1, P2 et P3 ont un diamètre de 500 mm, P1 et P2 (forage simple) ont

une profondeur de 15 m et P3 (forage à la tarière creuse) fait 20,2 m de longueur. Les axes des pieux sont distants de 2 m et 5 m par rapport au piédroit du tunnel pour P2 et P3, respectivement. Les pieux se situent dans trois plans transversaux espacés de 10 m (Figure 1b).



Figure 1. Positions des pieux par rapport au tunnel

#### 2 Instrumentation des pieux

Pour les fibres

#### 2.1 Disposition et schéma d'implantation

Les pieux sont instrumentés par des cordes vibrantes et des fibres optiques de type monomode « SMF » avec rétrodiffusion Brillouin (Figure 2a). Chaque pieu comporte huit filants d'acier HA14 numérotés de 1 à 8 : les cordes sont installées sur les filants impairs et les fibres sur les filants pairs (Figure 2b). Les cordes couvrent presque la totalité de la cage d'armature (Figure 2c) avec un espacement de 2 m pour P1 et P2 et 3 m pour P3. Elles sont fixées sur les filants par des colliers de serrage (Figure 2d) et les fibres par des rubans adhésifs. Chaque pieu comporte deux fibres formant un « U » sur les filants 2-6 et 4-8, avec un tube de protection à mi-longueur au fond du pieu (Figure 2e).

Chaque corde vibrante est branchée indépendamment à la centrale d'acquisition par un multiplexeur, tandis que les fibres sont branchées en série à la centrale optique en utilisant des câbles de liaison optique (Figure 3). La lumière émise par la centrale optique traverse dans l'ordre P1, P2 puis P3 et on obtient pour chaque pieu un profil de déformation le long de chacun des quatre filants pairs où sont installées les fibres.

Le calcul de déformation repose sur les formules ci-dessous : pour les cordes, les coefficients d'étalonnage GF (gauge factor) et BG (batch factor) sont respectivement 3.718 et 0.958. Pour les fibres, C<sub> $\epsilon$ </sub> et C<sub>T</sub> correspondent aux sensibilités à la déformation et à la température (Piccolo, et al., 2020) et valent respectivement 450 MHz / % et 4.2 MHz / <sup>0</sup> C. La déformation est comptée positivement en compression et les fréquences aux instants t et t0 (référence de calcul) sont en Hz. Dans ce qui suit, le calcul de déformation de la fibre néglige le deuxième terme du membre de droite de l'équation (3) à cause de l'absence de mesure de la température dans les pieux.

Pour les cordes 
$$\varepsilon(t) = GF \times BG \times (f(t)^2 - f(t_0)^2)$$
 (1)

$$f(t) - f(t_0) = C_T \Delta T(t) + C_\varepsilon \varepsilon(t)$$
<sup>(2)</sup>

ou encore 
$$\varepsilon(t) = \left(\frac{f(t) - f(t_0)}{C_{\varepsilon}}\right) - \left(\frac{C_T \Delta T(t)}{C_{\varepsilon}}\right)$$
(3)



Figure 2. Instrumentation des pieux par des cordes vibrantes et des fibres optiques



Figure 3. Branchement des fibres optiques à la centrale optique

#### 2.2 Lissage de la courbe de déformation de la fibre optique

Les mesures brutes de déformation par fibre optique présentent des irrégularités et des singularités (Figure 4a) liées aux différentes sources de bruit optiques et mécaniques : un traitement du signal est nécessaire pour lisser la courbe de déformation. On utilise ici une moyenne glissante arithmétique : (1) dans un premier temps, on élimine les points ayant des valeurs dépassant 500  $\mu$ m/m ; (2) ensuite, on compare la déformation à une position x<sub>i</sub> avec la moyenne sur un mètre autour de cette position ; on élimine les points pour lesquels la valeur locale est trop différente de la moyenne. De manière plus précise, on considère la condition :

$$|\varepsilon_i - \varepsilon_{i,moy}| \le 50 \ \mu m/m \ \text{avec} \ \varepsilon_{i,moy} = \frac{\sum_{x_i \to 0.5}^{x_i + 0.5} \varepsilon_k}{N_i} \tag{4}$$

où  $\epsilon_i$  est la déformation à la position  $x_i$ ,  $N_i$  le nombre des points entre  $x_i - 0.5m$  et  $x_i + 0.5m$  et  $\epsilon_{i,mov}$  la déformation moyenne de cette intervalle. On conserve les points

vérifiant cette condition. Pour les autres points, on remplace la déformation à la position  $x_i$  par la moyenne sur un mètre autour du point considéré. On obtient la nouvelle courbe de déformation « lissage 1 » présentée dans la Figure 4(a) et (b). L'étape suivante consiste à discrétiser la courbe de déformation pour réduire encore le bruit du signal optique. A chaque point discrétisé, correspond une déformation moyennée sur un intervalle de 2 m autour du point. On passe de la courbe « lissage 1 » dans la Figure 4b à la courbe « lissage 2 » dans la Figure 4c. Une comparaison entre les trois courbes (brute, lissage 1 et lissage 2) est présentée dans la Figure 4d.



Figure 4. Lissage de la courbe de déformation de la fibre optique

#### 3 Réponse des pieux au chargement

Les pieux ont été chargés en utilisant des vérins hydrauliques de capacité de 2500 kN prenant appui sous des massifs poids constitués de poutres métalliques. Le chargement initial a été réalisé fin février 2020 par des paliers de 400 kN environ jusqu'à 2100 kN pour les trois pieux. La charge appliquée correspond à 50 % de la capacité portante de P1 et P2 et 30% de celle de P3.

Les tassements de P1, P2 et P3 à la fin de chargement étaient 2,5 mm, 3,2 mm et 1,9 mm, respectivement. Pour calculer les efforts internes, on évalue les modules des pieux en utilisant la méthode des modules sécants qui prend en compte la dépendance du module avec la déformation (Fellenius, 2001) ; (Lam & Jefferis, 2011) ; (Szymkiewicz, et al., 2021b). On établit pour chaque pieu pendant le chargement la courbe module – déformation en tête de pieu et on suppose que cette courbe est applicable tout au long du pieu. A la fin du chargement, les modules varient, entre la tête et la pointe du pieu, dans les intervalles [38 GPa ; 48 GPa] pour P1 et P3 et [35 GPa ; 42 GPa] pour P2.

La Figure 5 présente les efforts axiaux dans les pieux pour trois paliers de chargement, pour les deux systèmes de mesure (FO pour fibres optiques et CV pour cordes vibrantes). Les mesures optiques et les mesures par jauges donnent des résultats très similaires pour tous les paliers de chargement. Pour P1 et P2, une différence entre les mesures est observée en tête de pieu pour le dernier palier de 2054 kN : ces deux pieux ont été

chargés jusqu'à 1900 kN fin février 2020, puis cette charge a été augmentée de 200 kN après deux semaines. Pendant ces deux semaines, des variations de température ont eu lieu ce qui a abouti à cette différence de mesure en tête de pieu. Cette différence n'apparait pas dans la courbe de P3 vu que ce dernier a été chargé jusqu'à 2100 kN dans la même journée.

La distribution des efforts axiaux montre que la charge appliquée est reprise totalement par le frottement latéral sans mobilisation de la pointe.



Figure 5. Distributions des efforts dans les pieux pour plusieurs paliers de chargement

### 4 Réponse des pieux au creusement

## 4.1 Calibrage de mesure de la fibre optique

Les pieux ont été maintenus chargés pendant plusieurs mois ; le passage du tunnelier a été retardé de mars à juillet 2020 à cause de la pandémie de coronavirus. Pendant cette période, la déformation mesurée par les cordes vibrantes augmente à cause du fluage du béton, tandis que les fibres optiques montrent une diminution sur les quatre premiers mètres de profondeur. Ce problème a été observé par (Bangke, et al., 2021) ou (Gao, et al., 2019). Une comparaison des efforts axiaux dans P1 au premier juillet montre clairement cette différence de mesure (Figure 6a) : les valeurs données par les fibres optiques sont en bon accord avec celles des cordes vibrantes tout au long des pieux à l'exception des guatre premiers mètres où les efforts sont beaucoup plus faibles (la courbe continue correspond à la mesure de la fibre optique avant le deuxième lissage). Pendant ces quatre mois, la température atmosphérique a augmenté de 10<sup>°</sup> C en moyenne, ce qui peut affecter les mesures dans la fibre ; dans notre cas, le second terme dans l'équation (3), qui correspond aux effets thermiques, n'a pas pu être pris en compte parce qu'on n'a pas mesuré la température dans les pieux. Cependant, les câbles de liaison optique à l'extérieur des pieux ont été soumis à cette variation thermique atmosphérique. En remplaçant  $\Delta T$  par 10<sup>o</sup> C dans l'équation (3), le second terme donne une valeur de 933 µm/m, ce qui est cohérent avec les mesures dans les câbles de liaison entre pieux (Figure 6c). On peut aussi rapprocher les mesures des fibres de celles données par les cordes en prenant en compte une variation de température de 3 à 4 °C en tête de pieu. Pour corriger les mesures de la fibre optique avant le passage du tunnelier, on a extrapolé la courbe de l'effort axial de z = -4 m jusqu'à la surface du sol en utilisant le frottement qu'on calcule avec les mesures des cordes le long de ces quatre premiers mètres. La courbe corrigée pour P1 est présentée dans la Figure 6b.



Figure 6. Comparaison de l'effort axial FO et CV avant (a) et après (b) calibrage le 01/07/2020 (c) effet de l'augmentation de la température sur la déformation dans la fibre optique

#### 4.2 Efforts internes dans les pieux

Le tunnelier est arrivé sous le site TULIP le 3 juillet 2020. Les figures 7, 8 et 9 présentent les efforts normaux et les moments fléchissants dans les pieux le 1<sup>er</sup> juillet, avant passage du tunnelier (courbes bleues) et le 8 juillet (courbes orange) quand le front de taille était situé 40 m, 30 m et 20 m plus loin que P1, P2 et P3 respectivement. La description du site et du tunnelier et la réponse des pieux (efforts, déplacements, frottements et charges en pointe) et du sol (déplacements en surface et en profondeur) sont détaillés dans (Mohamad, et al., 2022), (Michalski, et al., 2022) et (Berthoz et al., 2022).

Le pieu P1, dans l'axe du tunnel, tasse de 14 mm en tête suite au passage du tunnelier, avec un tassement du sol de 11 mm au même niveau. Le tassement différentiel du pieu par rapport au sol est associé à une mobilisation du frottement et une diminution de l'effort axial le long du pieu. La diminution maximale vaut 620 kN à z = -10 m. La tête de P2, à 7 m de l'axe du tunnel, tasse autant que le sol avoisinant (8 mm) et présente des faibles variations de l'effort axial. P3, à 10 m de l'axe du tunnel, présente un tassement de 5 mm suite au creusement et les efforts axiaux augmentent avec l'avancement du tunnelier. L'augmentation maximale était de 800 kN à z = -16 m quand le front du tunnelier était 40 m plus loin que le pieu (cette valeur a été mesurée par les cordes vibrantes, les mesures sur la fibre ayant été arrêtées le 8 juillet, 20 m après passage sous P3).



Figure 7. Efforts internes dans P1 avant et après creusement (dates en 2020)



Figure 8. Efforts internes dans P2 avant et après creusement (dates en 2020)





Les moments dans les trois pieux causés par le creusement sont de faible magnitude (< 20 kN.m) dans les deux directions transversale (Mx) et longitudinale (My).

Les deux systèmes de mesures montrent des résultats similaires en termes d'évolution des efforts axiaux et de magnitude de variation. La principale différence concerne l'effort axial dans P3 après creusement : la fibre optique montre un frottement presque nul à partir de z = -13 m contrairement aux cordes vibrantes. La concordance de deux types mesures est moins claire pour les moments fléchissants, mais ils sont faibles.

#### 5 Conclusions

Cette communication présente la réponse des pieux au creusement par deux systèmes de mesure (cordes vibrantes et fibres optiques) sur une ligne de Grand Paris Express. Les détails de l'instrumentation, le traitement des données et les efforts dans les pieux après chargement et creusement ont été exposés. Les résultats montrent l'influence de la position du pieu par rapport au tunnel sur l'évolution des tassements et des efforts.

Les mesures par cordes vibrantes et par fibre optique sont comparables, avec des faibles différences qui peuvent être expliquées entre autres par la méthode de mise en place des deux types de capteurs sur les filants : la fibre suit les filants de la cage et les changements de direction peuvent introduire des artefacts dans les résultats. Ces artefacts peuvent être en partie évités par exemple en insérant la fibre dans un tube de

réservation après la mise en place de la cage, qu'on remplit ensuite de coulis de ciment, comme cela a déjà été fait avec succès (Szymkiewicz et al., 2021a). Dans le cadre de ce projet, on a procédé à un lissage des mesures avant de les analyser. Les fibres permettent d'acquérir des mesures plus rapprochées dans l'espace, mais nécessitent sur les premiers mètres, surtout pour les essais durant plusieurs jours, une correction en température, facilement réalisable par différents moyens (par exemple la pose d'un unique capteur de type corde vibrante en tête de pieu). Le choix de la technologie de fibre optique est aussi déterminant pour la qualité des mesures : la comparaison des technologies Brillouin (utilisée dans cette étude) et Rayleigh, toutes deux a priori adaptées pour l'instrumentation d'éléments de type pieux élancés, pourrait permettre d'affiner les mesures et donc l'évaluation des efforts le long des éléments de fondations. Malgré ces quelques précautions à prendre et corrections à apporter, l'utilisation de la fibre optique pour le monitoring des éléments de fondations semble assez robuste pour s'affranchir de l'utilisation en parallèle d'une autre technique de mesure de déformations plus éprouvée.

# 6 Références bibliographiques

- Bangke R., Hehua Z., Yi S., Xiaozhou Z. & Tengteng Z. (2021). Deformation monitoring of ultra-deep foundation excavation using distributed fiber optic sensors. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 861.
- Barrias A., Casas J. & Villalba S. (2016). A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. Sensors, 16(748).
- Berthoz N., Bourgeois E., Branque D., Michalski A., Mohamad W., Le Kouby A., Szymkiewicz F., Kreziak C. (2022). Impact d'un tunnelier sur un pieu : synthèse de l'exercice de prévision TULIP. Proposé à la Revue Française de Géotechnique.
- Fellenius B.H. (2001). From train measurements to load in an instrumented pile. Geotechnical News Magazine, 19(1), pp. 35-38.
- Gao L., Han C., Xu Z., Jin Y. & Yan J. (2019). Experimental Study on Deformation Monitoring of Bored Pile Based on BOTDR. Applied Sciences, Volume 9.
- Kaalberg F. J., Teunissen E., Van Tol A. F. & Bosch J. W. (2005). Dutch research on the impact of shield tunnelling on pile foundations. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 1615-1620.
- Lam C. & Jefferis S. A. (2011). Critical assessment of pile modulus determination methods. Canadian Geotechnical Journal, Volume 48, pp. 1433-1448.
- Michalski A., Branque D., Berthoz N., Mohamad W., Szymkiewicz F., Le Kouby A. & Bourgeois E. (2022). TBM soft ground interaction during EPB tunnelling in Parisian soil, soumis à Géotechnique.
- Mohamad W., Bourgeois E., Le Kouby A., Szymkiewicz F., Michalski A., Branque D. & Berthoz N. (2022). Full scale study of pile response to EPBM tunnelling on a Grand Paris Express site. Tunnelling and Underground Space Technology 124(3): 104492. https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104492
- Piccolo A., Delépine-Lesoille S., Friedrich E., Aziri S., Lecieux Y. & Leduc D. (2020). Mechanical Properties of Optical Fiber Strain Sensing Cables under □-Ray Irradiation and Large Strain Influence. Sensors, 20(696).
- Selemetas D., Standing J.R. & Mair, R.J. (2005). The response of full-scale piles to tunnelling. Amsterdam, In Proceedings of the Fifth International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.
- Symkiewicz F., Minatchy C. & Reiffsteck P. (2021a), Static pile load tests: contribution of the measurement of strains by optical fiber. Int J of GEOMATE, 20 (81), pp44-51.
- Szymkiewicz F., Le Kouby A., Sanagawa T. & Nishioka H. (2021b). Feedback on static axial pile load tests for better planning and analysis. 2<sup>nd</sup> Int Conference on Press-in Engineering, Kochi, Japan.