

ÉVALUATION DU FROTTEMENT LORS DE LA MISE EN PLACE DE PIEUX PREFABRIQUES AUTOFORANTS

EVALUATION OF FRICTION DURING THE INSTALLATION OF SELF-DRILLING PREFABRICATED PILES

Juan Carlos Balbuena Ponce¹, Jean De Sauvage¹, Patrick Joffrin¹, Jean-Pierre Rajot¹, Philippe Robit², Anthony Martens².

¹ Univ Gustave Eiffel, GERS-RRO, 69675 Bron - France

² NGE Fondations, 29 Rue des Tâches, 69804 Saint-Priest - France

RÉSUMÉ – Cet article présente une nouvelle technologie pour la réalisation des fondations profondes basée sur des éléments creux préfabriqués autoforants. Dès le développement l'accent a été mis sur l'influence de la technique d'exécution sur le frottement axial entre le sol et le pieu. Des essais sur site ont été réalisés pour évaluer les performances de cette nouvelle technique de mise en œuvre. Le frottement axial initial le long du pieu expérimental est déduit des efforts verticaux mesurés par capteurs de force, placés à chaque jonction entre éléments tubulaires successifs et suivis pendant toute la durée de mise en œuvre.

ABSTRACT – This paper presents a new technology for deep foundations based on self-drilling prefabricated hollow elements. First on-site tests were carried out to assess the performance of the new pile installation technique. Focus was placed on the influence of the new installation technique on the initial soil-shaft axial friction, which was observed using load sensors placed between the successive tubular elements and monitored during the pile installation in the ground.

1. Introduction

Parmi les technologies de pieux, deux types peuvent être distingués : les pieux coulés en place et les pieux préfabriqués. Les pieux coulés en place consistent à forer le sol pour placer des armatures en acier et du béton fluide dans l'excavation. D'autre part, utilisée moins couramment, les pieux préfabriqués peuvent être composés d'un seul élément ou, lorsqu'ils ne forment pas une structure continue, peuvent être assemblés à partir de plusieurs éléments ; ils sont introduits dans le sol à travers des méthodes telles que le battage, le battage à vibro, ou d'autres techniques. Bien que les deux techniques présentent des inconvénients, les pieux forés rencontrent des défis tels que la difficulté à placer les cages, les risques pour la sécurité des travailleurs, et une utilisation de béton plus importante par rapport aux éléments préfabriqués.

Dans ce contexte, un nouveau type de fondations profondes émerge : les pieux creux auto-perforants. En combinant des éléments des deux techniques traditionnelles, le forage est effectué simultanément avec l'enfoncement des éléments préfabriqués. De cette manière, NGE Fondations et le Laboratoire RRO développent une technique innovante basée sur l'utilisation d'éléments tubulaires qui remplacent les pieux conventionnels.

Cette nouvelle technique soulève une question : comment la friction entre les éléments et le sol affecte-t-elle leur processus d'enfoncement, et comment cette friction peut-elle être estimée et minimisée ?

Par conséquent, nous avons réalisé des tests de poussée vers le bas des pieux creux à Saint-Julien-l'Ars, pour quantifier la friction entre le sol et les éléments. Pendant

l'installation de ces pieux, des capteurs de charge ont été placés au niveau des connexions entre les éléments pour mesurer les forces résultantes.

2. Pieux creux

Les pieux creux sont une forme innovante de fondation profonde. Ces pieux se composent d'éléments métalliques préfabriqués de forme creuse qui sont installés dans le sol à l'aide de diverses techniques telles que le forage et le poussage. La nature creuse de ces pieux leur permet d'être plus légers que les pieux traditionnels, offrant des avantages en termes d'installation.

Parmi les types de pieux creux, un sujet intéressant à analyser est le processus d'enfoncement et d'installation dans le sol. Les sous-sections suivantes expliquent ces processus.

2.1. Pieux PHC

Les pieux en béton précontraint de haute résistance (Prestressed high-strength concrete, PHC en anglais) sont des pieux précontraints et centrifuges, communément adoptés comme fondations profondes. Les méthodes d'installation impliquent généralement une procédure de 'jacking', mais elle est variable. La méthode de 'jacking' est préférée car elle évite le bruit, les vibrations et la pollution des boues. Par conséquent, elle est plus adaptée à l'installation de pieux en milieu urbain (Kou et al., 2018).

2.2. Pieux DCP

Lorsque l'on dispose de pieux (PHC) de gros diamètre, l'effondrement du trou est facilement rencontré pendant le processus de perforation, dans ce que l'on pourrait appeler la 'partie libre'. Cette partie se situe en dessous du pieu, là où la foreuse excave le sol pour permettre à l'élément de pilote d'être enfoncé vers le bas. Ces pieux sont limités par la technique de construction au marteau ou à la méthode de pression statique, et la plage de diamètres est d'environ 300 à 600 mm, c'est pourquoi ces caractéristiques deviennent un obstacle lorsque la nécessité de travailler avec des diamètres plus importants se présente (Hou et al., 2020).

En Chine, une méthode de construction a été développée, appelée forage avec pieux tubulaires en béton de haute résistance précontraint (Drilling with PHC Pipe Cased Pile, DPC en anglais), résolvant ainsi le problème d'enfoncement causé par les pieux de grand diamètre. Ce nouveau type de pieux couvre une large plage de diamètres, allant de 800 à 1400 mm.

Voici les principales caractéristiques :

- Embouts en entonnoir pour les pieux (voir Figure 1 a)).
- Un foret extensible est connecté au foreuse à tarière (see Figure 1 b)). La tarière peut pénétrer dans le sol à travers la cavité du pieu tubulaire.
- Le diamètre du trou de forage est d'environ 20 mm plus grand que le diamètre externe du pieu PHC, ce qui garantit que le pieu PHC s'enfonce synchroniquement avec la mèche de forage.
- Il n'y a aucun contact entre le pieu et le sol. Un clavage au coulis est réalisé via une conduite d'injection intégrée à la paroi externe du pieu.



Figure 1. a) Embouts de pieu en acier - connexion soudée et b) Foret extensible (Hou et al., 2020)

De manière similaire, il existe une autre variante de ce type de pieu DCP qui implique de enfoncer les pieux avec une tête vibrante à la pointe de la machine, visant à réduire l'altération ou les dommages aux éléments PHC, communément appelés pieux HBPC (Hybrid Bored Prestressed Concrete Cased piles en anglais) (Chen et al., 2018).

2.3. *Technique développée par NGE Fondations et le Laboratoire RRO*

NGE Fondations a développé des éléments creux métalliques préfabriqués, lesquels sont utilisés comme pieux pour être enfoncés dans le sol par auto-forage et poussés vers le bas. Pour les besoins de notre étude, nous utilisons des éléments en métal afin d'évaluer le procédé de forage, bien que les éléments développés par NGE soient en béton. Deux types d'éléments creux ont été conçus à cet effet, tous deux avec un diamètre extérieur de 0,60 m et un diamètre intérieur de 0,30 m. Le premier type sert de pointe inférieure de l'élément de pile complet, mesurant 2,0 m de longueur et présentant une pointe en forme d'entonnoir pour faciliter l'entrée dans le sol tandis que la tête de forage est insérée à travers l'élément. Le deuxième élément métallique, d'une longueur de 4,0 m, comprend une pointe intérieure et extérieure, permettant la connexion entre elles comme le montre la Figure 2.

Nous avons travaillé avec une tête de forage extensible, qui présente l'avantage de pouvoir passer à travers les éléments creux (à l'état rétracté) et, une fois arrivée à la pointe, elle s'étend et commence le processus de forage du sol. Le diamètre d'excavation généré par cette tête extensible est légèrement plus grand que le diamètre extérieur des éléments creux, afin de faciliter leur enfoncement.

Dans le test décrit ci-dessous, nous avons utilisé deux pieux métalliques creux du premier type et trois du deuxième type, chacun pesant 1,7 tonnes, désignés respectivement comme Élément 1, Élément 2 et Élément 3.

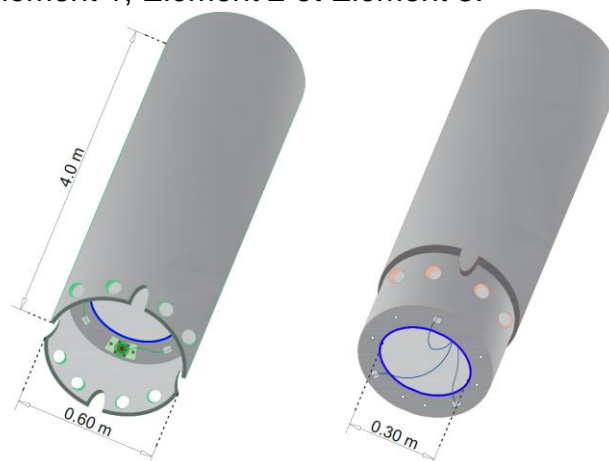


Figure 2. Deuxième type d'éléments creux métalliques préfabriqués (détail de la pointe intérieure et extérieure)

3. Essai sur le terrain

3.1. Procédure Générale

Le test a été réalisé en deux étapes distinctes. Dans la phase initiale, des éléments de 2,0 m de longueur, divisés en deux unités comme indiqué dans la Figure 3, ont été installés. Ces éléments n'étaient pas équipés de capteurs de charge et servaient essentiellement de support préliminaire pour le forage, comme mentionné ci-dessus, facilitant la pose des éléments suivants.

La phase suivante a consisté en l'installation descendante d'une prochaine section (longueur de 4 m) d'éléments instrumentés. L'instrumentation consistait en l'installation de 3 capteurs de charge entre chaque connexion d'élément (voir ci-dessous). Cette phase a marqué le début de la mesure de force pendant le processus de conduite. Ce processus a été répété jusqu'à ce qu'une profondeur de 16 mètres.

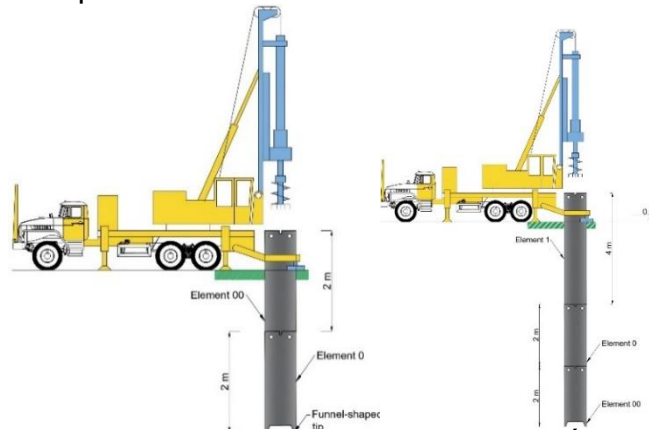


Figure 3. Installation des éléments initiaux et de l'Élément 1

À chaque étape, à la fois la pointe externe et la pointe interne sont reliées par des vis pour maintenir l'articulation solide. De la même manière, la tête de l'élément qui sera enfoncée est attachée à l'aide de vis au siège de la machine. Ainsi, la perceuse commence à fonctionner en poussant le pieu en même temps que le sol excavé est enlevé.

4. Identification du sol

Cette série de tests a été réalisée à l'automne 2023 à Saint-Julien-l'Ars, près de Poitiers, dans les installations de NGE Fondations. Pendant l'opération de forage, des échantillons de sol ont été prélevés pour évaluer la composition et les propriétés à différentes profondeurs pendant que la perceuse avançait vers le bas. Au total, huit échantillons représentatifs ont été collectés à différentes profondeurs. En raison de la similarité des propriétés dans certains des échantillons récupérés, le sol a pu être divisé en trois couches distinctes. Les descriptions suivantes résument brièvement ces couches :

- Couche 1 (0-1,5 m) : Sol résiduel avec des restes de sable lâche.
- Couche 2 (1,5-11 m) : Argile plastique à forte teneur en humidité, de couleur jaunâtre.
- Couche 3 (11-16 m) : Sol calcaire avec des morceaux de gravier de taille importante, de couleur jaunâtre.

Il est à mentionner qu'un sondage pressiométrique a été réalisé sur ce site en février 2015 et qu'aucune présence de nappe phréatique n'a été détectée. Ces résultats sont cohérents avec les caractéristiques des différents strates identifiées lors de l'analyse des échantillons de sol récupérés.

5. Surveillance des données

Comme mentionné précédemment, les capteurs de charge étaient positionnés à l'intérieur de la pointe externe de chaque élément. Ces capteurs commencent à enregistrer la force axiale entre les éléments dès qu'ils entrent en contact avec la pointe interne de l'élément, comme le montre la Figure 4. Les enregistrements étaient effectués à une fréquence de 100 Hz, équivalente à chaque 0,01 seconde.

En ce qui concerne l'évaluation des charges ; des capteurs de charge ont été positionnés à l'intérieur de la pointe externe, comme illustré dans la Figure 3 a). Le trio de capteurs est installé directement sur la plaque de surface et devient opérationnel au contact de la pointe interne (Figure 4 b)).

Nous avons veillé à ce que l'enregistrement de la force axiale passe entièrement et uniquement à travers les capteurs de charge par le simple fait que, lors de la poussée vers le bas, les vis de connexion n'avaient de contact qu'avec la partie de l'embout externe, comme le montre la Figure 5 b). En clair, les vis ne sont actives que lorsque le pieu est retiré du sol. Cette caractéristique de conception garantit que la pression exercée par la machine est transmise exclusivement à travers les capteurs de charge. Dans cet essai, la totalité des éléments ont été retirés à la fin pour la récupération des capteurs de charge.

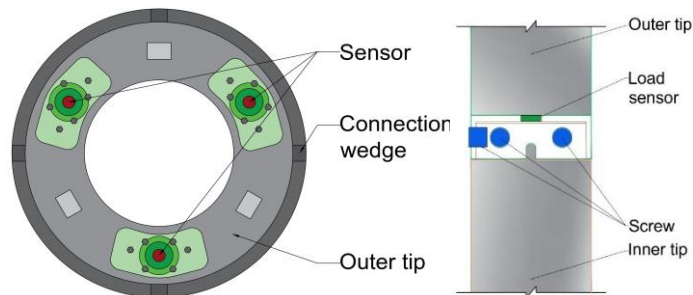


Figure 4. a) Ensemble de capteurs de charge autour le pointe externe et b) détail de la connexion entre les éléments.

Il est important de mentionner que les capteurs étaient déconnectés à chaque fois qu'un nouvel élément était installé, et l'arrangement spatial des capteurs n'était pas pris en compte. L'objectif de la collecte de données était la force totale appliquée (somme des capteurs de charge) aux points de connexion entre les éléments, plutôt que les lectures individuelles des capteurs.

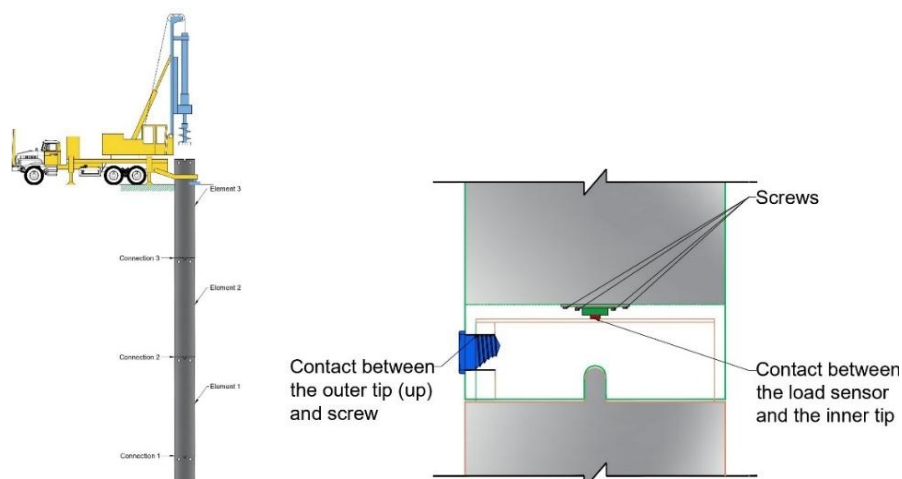


Figure 5. a) Nomenclature des éléments de connexion et d'éléments et b) Contact de jonction à l'intérieur des vis

Dans ce test, les capteurs de charge deviennent opérationnels dès la connexion de l'élément supérieur à l'élément inférieur (voir Figure 4). Au fur et à mesure que l'élément supérieur commence à être percé et poussé dans le sol, les données des capteurs de charge sont transmises au stockage informatique. Ces données représentent la répartition des charges par rapport au temps à l'interface entre les deux éléments, mesurées en unités de tonne-force.

6. Résultats du test

Le battage des trois principaux éléments s'est déroulée sur une période de trois jours, du 19 au 21 septembre. Le premier jour, l'Élément 1 a été entièrement enfoncé, suivi de la conduite de l'Élément 2 et d'une partie de l'Élément 3 le jour suivant. Le dernier jour de travail, le 21 septembre, s'est avéré être le plus difficile en raison des conditions du sol rencontrées dans le troisième couche. De plus, le pieu total a été segmenté en connexions et en éléments, comme illustré à la Figure 5 a). Comme nous le verrons et l'expliquerons ci-dessous, chaque jour d'essai a été divisé en 'push down' en raison des pauses prises pendant la journée de travail. Par exemple, le 20 septembre, il y a eu 4 push down, dont nous expliquerons les résultats obtenus ci-dessous.

6.1. 20 Septembre, première push down

Le deuxième jour des tests, une fois que l'Élément 1 était entièrement enfoncé dans le sol, la poussée vers le bas de l'Élément 2 a commencé. L'enregistrement de ce premier test a duré environ une heure et demie (voir Figure 6). Il convient de noter que dans certaines parties du test, il semblait y avoir des problèmes de fonctionnement des capteurs de charge, et ce comportement est perceptible entre les minutes ~1540 et ~1555. Après cette période, le comportement semble peu fiable, probablement en raison d'une anomalie dans la connexion des câbles à l'intérieur de l'élément. Ces résultats correspondent au frottement généré dans l'Élément 2. Pour ce cas, le frottement a été calculé par un équilibre des forces agissantes comme suit.

$$\tau_2 \times \pi \phi L = F + W - f_2 \quad (1)$$

Ici, nous considérons que τ_2 fait référence au frottement sur l'Élément 2, par unité de surface, calculé comme la somme de la force, F , mise en œuvre par la machine sur la tête du premier (supérieur) élément et de son poids, W , égal à 1,7 tonne moins la somme des forces, f_2 , enregistrées par les capteurs de charge dans la connexion 2 (voir Figure 6 à droite). Il convient de noter que la force enregistrée sur les capteurs de charge dans la connexion 2 (0,65 tonne en moyenne) est constamment plus petite que la force mise en œuvre par la machine (4,04 tonnes en moyenne). La diminution de la force enregistrée est attribuée à la résistance au frottement inhérente au processus de poussée vers le bas, et ce comportement est considéré comme normal dans de telles conditions. Cela montre une interaction appropriée entre le pieu et le sol.

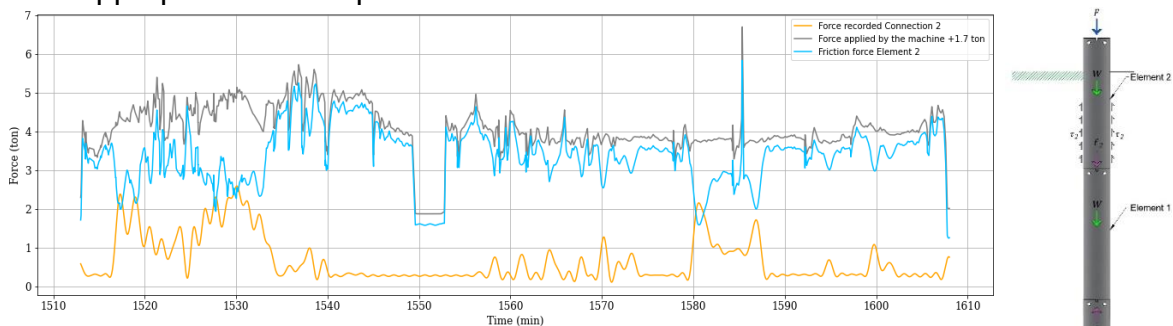


Figure 6. Répartition du frottement le long de l'Élément 2

De la même manière, la Figure 7 montre le frottement généré dans l'Élément 1 lors de la même étape de poussée vers le bas. Pour ce cas, le frottement est calculé à partir de l'expression suivante.

$$\tau_1 \times \pi \phi L = f_2 + W - f_1 \quad (2)$$

Comme dans le cas précédent, par équilibre, le frottement dans l'Élément 1, par unité de surface, est obtenu comme la différence des forces, f_2 et f_1 , enregistrées dans les connexions 2 et 1, plus le poids de l'élément, W . Au cours de cette partie du test, il est remarquable que le frottement généré dans cet élément est très faible (0,28 tonne en moyenne, ce qui correspond à $\tau_1 = 0,037$ kPa) et cela est dû à la nature du sol dans lequel nous encastrons l'Élément 1 et au fait qu'il s'enfonce dans un matériau qui a déjà été fortement remanié par la tête de forage. Dans ce cas, ainsi que dans ceux décrits en 6.2. et 6.3., la longueur totale de l'élément (L) est prise en compte dans le calcul, c'est-à-dire 4,0 m.

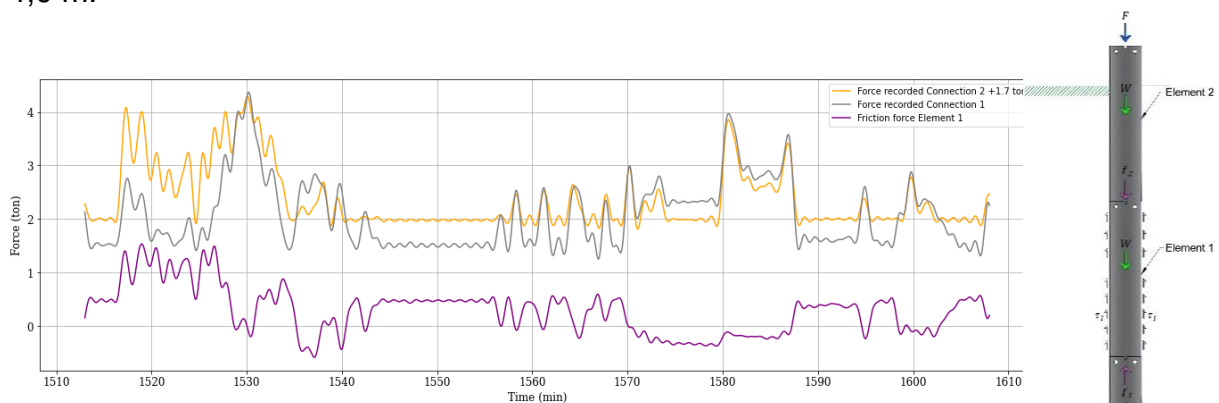


Figure 7. Répartition du frottement le long de l'Élément 1

6.2. 20 Septembre, quatrième push down

Comme étape finale du processus le 20 septembre, l'Élément 3 a commencé à être enfoncé et le frottement généré le long de celui-ci est représenté dans la Figure 8. Comme dans les cas précédents, le frottement, par unité de surface, est obtenu par l'expression 3, comme suit.

$$\tau_3 \times \pi \phi L = F + W - f_3 \quad (3)$$

Aussi, la force f_3 est lue par les capteurs de charge au bas de l'Élément 3. Ici, il est évident que les variations ou fluctuations dans le graphique de force enregistrées par les capteurs de charge ressemblent étroitement à celles de la force appliquée par la machine. La moyenne du frottement reste vraiment basse, proche de 1,23 tonne (ce qui correspond à $\tau_3 = 0,163$ kPa), ce qui signifie que la force exercée par la machine, en moyenne de 4,7 tonnes, n'est pas beaucoup plus grande que celle enregistrée par les capteurs de charge, 3,46 tonnes (en moyenne).

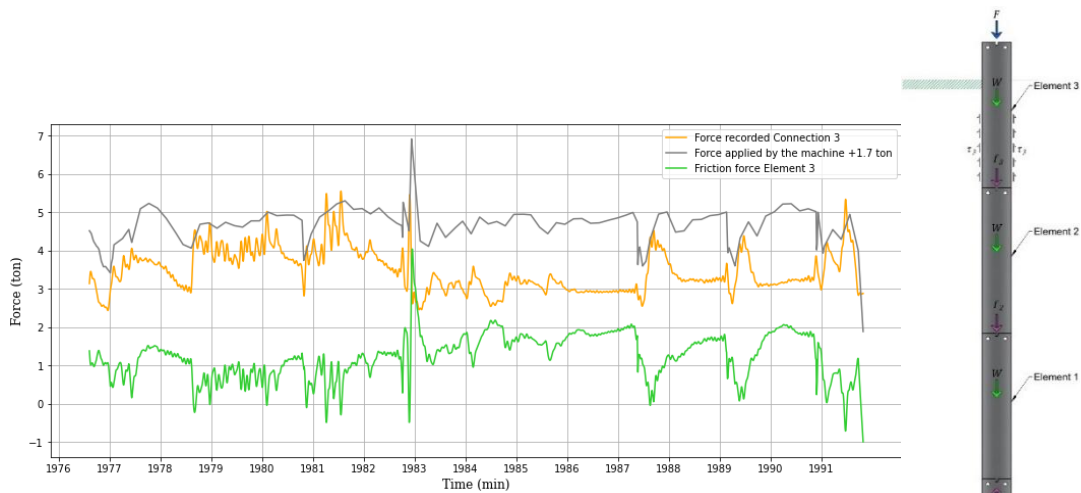


Figure 8. Répartition du frottement le long de l'Élément 3

7. Conclusions

Compte tenu de l'intérêt croissant pour les avancées technologiques dans le domaine des pieux, notre recherche s'est focalisée sur l'évaluation des capacités des pieux creux auto-perforants en tant que substitut aux méthodes traditionnelles de pieux coulés en place et de pieux préfabriqués. En s'appuyant sur la littérature existante mettant en évidence les types et l'installation des pieux creux, notre recherche visait à répondre à une question : Comment le frottement entre les éléments et le sol influence-t-il le processus de poussée vers le bas, et comment ce frottement peut-il être quantifié ?

À travers une série de tests de poussée vers le bas réalisés à Saint-Julien-l'Ars, nous avons cherché à obtenir des informations sur le comportement de friction des pieux creux dans différentes conditions de sol en mesurant les forces axiales à l'aide de capteurs de charge. En comparant la friction générée dans différents éléments lors du processus d'installation, nous avons cherché à commenter les principaux facteurs influençant les performances des pieux.

Les lignes suivantes mettent en évidence nos découvertes et fournissent des insights sur le comportement des pieux creux dans des conditions et des profondeurs de sol variables.

En comparant le frottement généré dans l'Élément 2 et l'Élément 1 lors du même enfoncement, nous pouvons noter quelques détails importants :

1. Dans les deux éléments, la friction reste positive comme indiqué dans l'Élément 2 ou très proche de 0, comme observé dans l'Élément 1.

2. La friction moyenne calculée dans l'Élément 1 est beaucoup plus faible que dans l'Élément 2 lorsqu'il était enfoncé. Cela pourrait être dû au fait que le sol dans lequel les éléments étaient encastrés était un matériau très plastique avec des propriétés de résistance très faibles. En d'autres termes, à mesure que l'élément était enfoncé plus profondément, les propriétés du sol devenaient de plus en plus faibles.

Au moment où nous avons commencé à enfoncer l'Élément 3, l'ensemble du pieu avait une profondeur totale de 12,0 m, c'est-à-dire que nous étions approximativement à la fin du stratum d'argile et au début du couche de calcaire avec gravier. C'est pourquoi la force que la machine a dû exercer sur la tête de l'Élément 3 était d'environ 4,7 tonnes en moyenne, plus élevée que les valeurs obtenues dans l'Élément 2 (Figure 6). D'autre part, la friction générée dans l'Élément 3 est relativement faible, ce qui peut être apprécié par les valeurs de charge très proches obtenues dans les capteurs, comparées à la machine, cela est également dû au fait que la partie supérieure du sol est très altérée par l'ensemble du processus de forage. Dans le cadre de ce projet, des tests sur des sols de différentes caractéristiques sont prévus, ainsi que l'utilisation d'éléments en béton, ce qui laisse supposer que les résultats de la résistance au frottement seront modifiés.

8. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble du personnel de NGE Fondations présent à Saint Julien l'Ars lors des essais pour son aide précieuse dans la réalisation des essais. Nos remerciements vont également à Myriam Duc et François Lansac pour leur analyse de type Rietveld des échantillons de sol. Enfin, nous tenons à remercier BPI France, financeur du projet dans lequel s'inscrivent ces essais.

9. Bibliographie

- Chen, H., Hu, H., Tang, M., Yang, X., & Zhu, J. (2018). Hybrid Bored Prestressed Concrete Cased Piles: Equipment and Construction Procedures. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Hai-Lei Kou et al. (2018) "Field Performance of Open-Ended Prestressed High-Strength Concrete Pipe Piles Jacked into Clay". *Sensors*, vol 18 (12).
- Tang, M., Hu, H., Cui, J., Yang, X., Hu, H., & Chen, H. (2020). The Vertical Bearing Mechanism of Hybrid Bored Pre-Stressed Concrete Cased Piles. *International Journal of Civil Engineering*, vol 18(3), pp 293–302.
- Yang, J., Tham, L. G., Lee, P. K. K., Chan, S. T., & Yu, F. (2006). Behaviour of jacked and driven piles in sandy soil. *Géotechnique*, vol 56(4), pp. 245–259.
- Zhenkun Hou et al. "A new type of PHC pile-sinking technology: Drilling with PHC Pipe Cased Pile and its development directions" (2020), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol 580 (1).