

ESSAIS DE CHARGEMENT STATIQUE SUR DES PIEUX TARIÈRE TYPE 3 A ÉVÉNTS ROTATIFS 3TER®

STATIC LOAD TESTS ON PILE TYPE 3 WITH ROTATIVE OUTLETS 3TER®

Laurent BRIANÇON¹, Serge LAMBERT², Emerson FLEC², Maurizio CHIANI³

¹ GEOMAS, INSA LYON, Villeurbanne, France

² KELLER Fondations spéciales, Duttlenheim, France

³ DIMIONE Systems, Brunoy, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de la rédaction de son cahier des charges sur le pieu tarière type 3 à évènents rotatifs 3TER®, la société Keller a réalisé une planche d'essais dans les sables et graviers afin de définir les coefficients de portance et le frottement de ce nouveau pieu. Les résultats sont concluants car ils donnent une portance globale bien plus élevée que celle obtenue pour le pieu tarière creuse figurant dans la norme NF P 94-262.

ABSTRACT – Within the framework of the writing of specifications concerning the auger pile Type 3 with rotary vents 3TER, Keller has made a loading test in sand and gravels in order to define the bearing capacity and friction. The results are successful because we obtain a bearing capacity much higher than the one of the auger pile contained in the standard NF P 94-262.

1. Introduction

Le pieu 3TER® développé par la société KELLER rentre dans la catégorie des pieux forés à la tarière creuse munie d'un dispositif de bétonnage rétractable nommée également tarière creuse type 3 dans la norme NF P 94-262. Le Pieu 3TER® s'appuie sur les dernières évolutions de la tarière creuse et sur une innovation au niveau du tube plongeur télescopique qui permet d'injecter le béton sous faible pression latéralement à partir de 2 évènements en rotation.

Ce procédé a fait l'objet d'un développement sur la base de plusieurs planches expérimentales dans différents contextes géologiques. Cet article expose les caractéristiques d'une planche d'essais menée dans les sables et graviers et les résultats obtenus.

2. Présentation du pieu 3TER®

Le pieu 3TER® est réalisé à l'aide d'une tarière creuse équipée d'un tube plongeur télescopique rotatif de 0,80 m minimum muni de 2 évènements latéraux en partie basse permettant le bétonnage immédiat dès sa sortie. Ces 2 évènements restent plongés en permanence dans le béton frais, assurant une meilleure qualité de bétonnage que la tarière creuse type 2 (tarière avec dispositif d'enregistrement spécifique des paramètres de forage et de bétonnage mais sans tube rétractable). Les diamètres usuels des pieux 3TER® varient de 420 à 1220 mm.

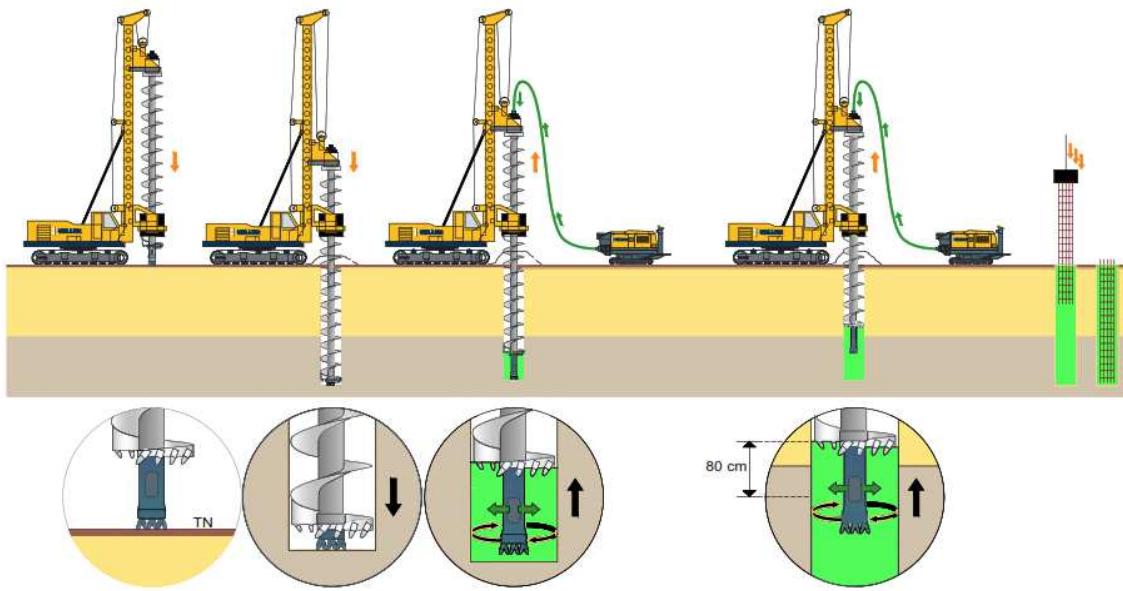


Figure 1. Principe de réalisation d'un pieu 3TER®.

Le tube télescopique est asservi à la rotation de la tarière, ce qui permet d'assurer une meilleure homogénéité du bétonnage lors de la construction du pieu. Cette rotation des évènements est également un moyen d'améliorer le contact sol-béton le long du fût et la portance de la pointe du pieu 3TER®.

Une autre particularité de l'outil 3TER® par rapport à la tarière classique est d'augmenter la capacité de forage à travers des horizons durs par la possibilité de rajouter des dents picots (de type Rockbit) placées à l'extrémité du tube plongeur par rapport à une tarière classique (Figure 2). Le tube est bloqué à l'intérieur de la tarière selon un dispositif qui permet de bénéficier pleinement du couple de la table de rotation lors du forage.

Enfin, ce type de pieu profite des dernières avancées en ce qui concerne les systèmes d'acquisition des données de forage et de bétonnage (type Lutz ou équivalent) :

- affichage des courbes de paramètres dans la cabine du foreur en temps réel sur écran,
- transmission instantanée des données sur l'ordinateur du chef de chantier et de l'ingénieur/ conducteur de travaux,
- récupération immédiate des données sur port USB pour diffusion et contrôle.

Ces avancées technologiques permettent de faciliter les contrôles et d'augmenter la réactivité dans la prise de mesure compensatoire en cas de détection d'anomalie.

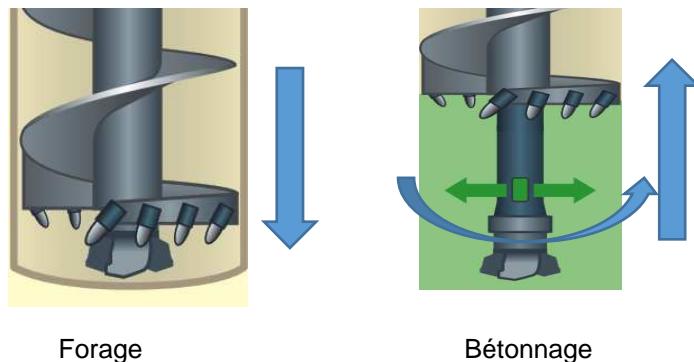


Figure 2. Détail du dispositif de bétonnage du pieu 3TER®.

Ces nombreuses améliorations apportées à cette technique font espérer que les performances en termes de pointe et de frottement sont supérieures à celles d'un pieu Pieux Forés à la Tarière Creuse simple rotation [FTC, n° 6] défini par la norme NF P94-262. Plusieurs planches expérimentales ont été réalisées dans différents contextes géologiques pour évaluer les performances de ce nouveau pieu et rédiger un cahier des charges particulier du pieu foré tarière creuse type 3 à Events Rotatifs. Cette communication présente précisément un essai réalisé dans un sol sablo-graveleux.

3. Essai de chargement statique

L'essai de chargement statique a été réalisé en octobre 2017 sur le site de KELLER Fondations spéciales à Duttlenheim (67). Cet essai a été conduit afin de déterminer le comportement du pieu en traçant la courbe de tassement en fonction de la charge appliquée. Le pieu de 4,8 m de long et 620 mm de diamètre a été réalisé avec un béton C40-50 trois semaines avant l'essai de chargement. Un essai pénétrométrique statique et un essai pressiométrique ont permis d'identifier les caractéristiques des horizons sablo-graveleux traversés par le pieu. La compacité des sables et graviers est élevée avec des qc de 20 à 60 MPa et des pressions limites variant de 3,8 à 6,7 MPa.

Le chargement a été appliqué à l'aide d'un vérin d'une capacité maximum de 6000 kN mis en place entre la tête du pieu et une poutre de réaction (Figure 3) constituée d'une poutre principale HEA1000 renforcée par des poutrelles de réaction secondaires perpendiculaires à la poutre principale en HEA300, l'ensemble étant fixé par huit pieux d'ancre de 620 mm de diamètre et 9 m de long travaillant en traction.

3.1. Instrumentation

Conformément aux préconisations de la norme NF P 94-151-1 (1999) :

- trois capteurs de déplacement ont été installés pour suivre de tassement de la tête du pieu,
- deux capteurs de déplacement mesurent le déplacement horizontal du pieu dans deux directions orthogonales,
- un capteur de force d'une capacité de 5000 kN mesure la force appliquée sur la tête du pieu.

Un dernier capteur de déplacement a été installé pour suivre le déplacement de la poutre de réaction à la verticale du pieu. Tous les capteurs de déplacement ont été positionnés sur une poutrelle métallique dont les deux embases ont été fixées sur des plots nivelés.

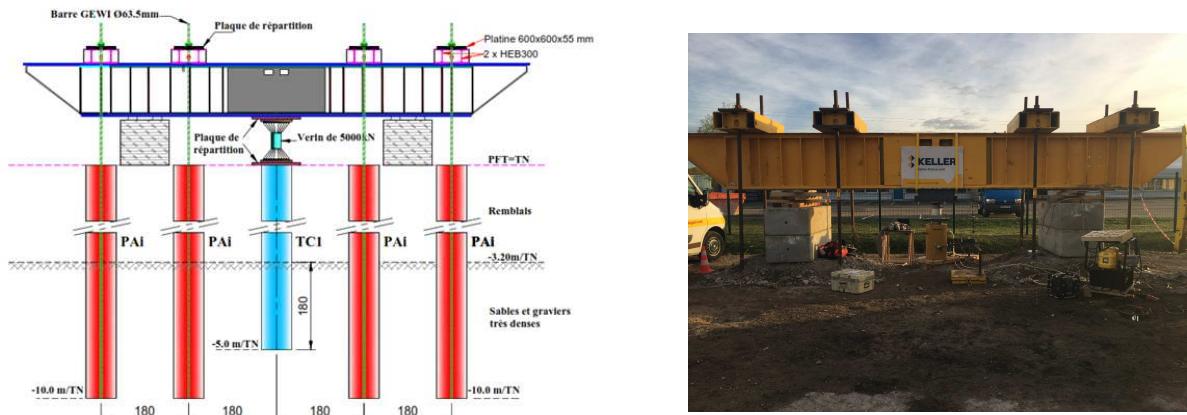


Figure 3. Dispositif de chargement du pieu

En plus des mesures de tassement et de force, la déformation du pieu a été mesurée par l'intermédiaire de jauge de déformations et d'une fibre optique. Les six jauge de déformation ont été collées sur la cage d'armature aux profondeurs suivantes :

- jauge 1 et 2 à 0,35 m de la tête du pieu,
- jauge 3 et 4 à 2,35 m de la tête du pieu,
- jauge 5 et 6 à 4,35 m de la tête du pieu (La jauge 6 a présenté un dysfonctionnement le jour de l'essai).

Lors de la réalisation du pieu, deux tubes de 50 mm de diamètre intérieur ont été fixés sur la cage d'armature. Deux semaines plus tard, une fibre optique a été installée dans un des deux tubes, puis le tube a été rempli par un coulis. Le second tube a servi de test pour l'introduction du coulis. La fibre optique n'a subi aucun endommagement lors de sa mise en œuvre.

La technologie utilisée pour mesurer la déformation se fait par la technologie de la rétrodiffusion Rayleigh grâce à un montage optique fondé sur la réflectométrie fréquentielle OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry).

Ces interrogateurs permettent des mesures réparties (ou distribuées) de la déformation et de la température le long d'une simple fibre optique. Cette dernière peut être collée sur la structure ou même noyée dans le cas de béton ou de composite par exemple, avec des milliers de points de mesures, de résolution centimétrique, voire millimétrique, et ce, sur de très grandes longueurs.

Pour cet essai, un instrument de la famille ODISI développé par la société Luna Innovation Inc, a été utilisé, il permet d'atteindre une résolution spatiale millimétrique sur un capteur à fibre optique de 20 m de long, à une fréquence d'acquisition de 50 Hz.

3.2. Chargement

La charge Q_{max} a été fixée à 5000 kN pour des raisons de sécurité vis-à-vis de la résistance de la poutre chargement. Les paliers de chargement ont été maintenus selon les critères suivants : 15 minutes sur les paliers de 400 kN à 2000 kN, 60 minutes pour les paliers de 2500 kN à 5000 kN (Figure 4).

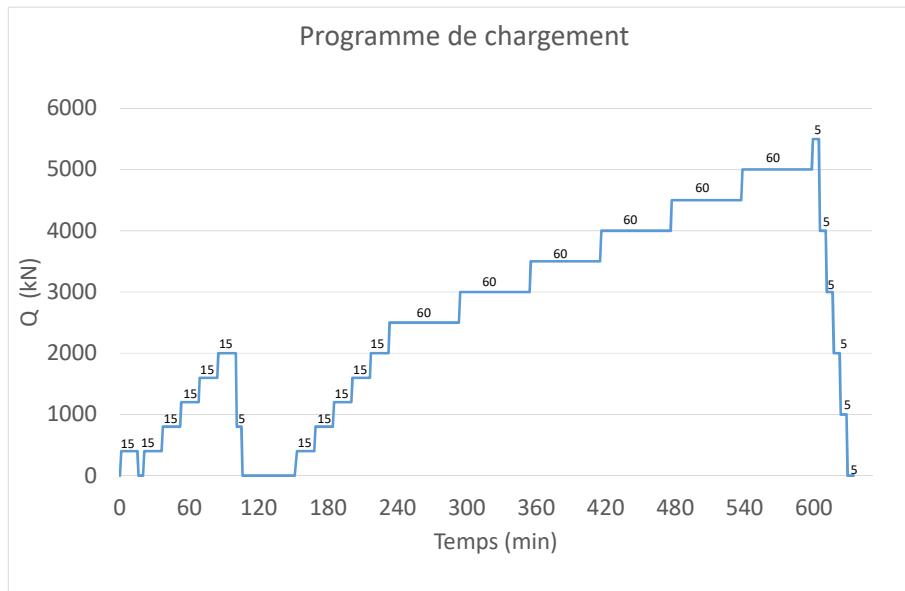


Figure 4. Programme de chargement

4. Analyse

4.1. Analyse des tassements

La Figure 5 présente la courbe de chargement $s = f(Q)$. L'essai a été stoppé pour une charge de 5500 kN mais maintenu que quelques minutes. Ce chargement explique l'allure de la courbe de déchargement. La Figure 6 présente la courbe de fluage. La force critique de fluage Q_{CE} est déterminée par une construction effectuée sur la courbe de la Figure 6 (α_n, Q_n). Les parties linéaires du début et de la fin de cette courbe sont prolongées jusqu'à leurs intersections, la bissectrice de l'angle qu'elle forme recoupe la courbe (α_n, Q_n) au point correspondant à la force critique de fluage $Q_{CE} = 3500$ kN.

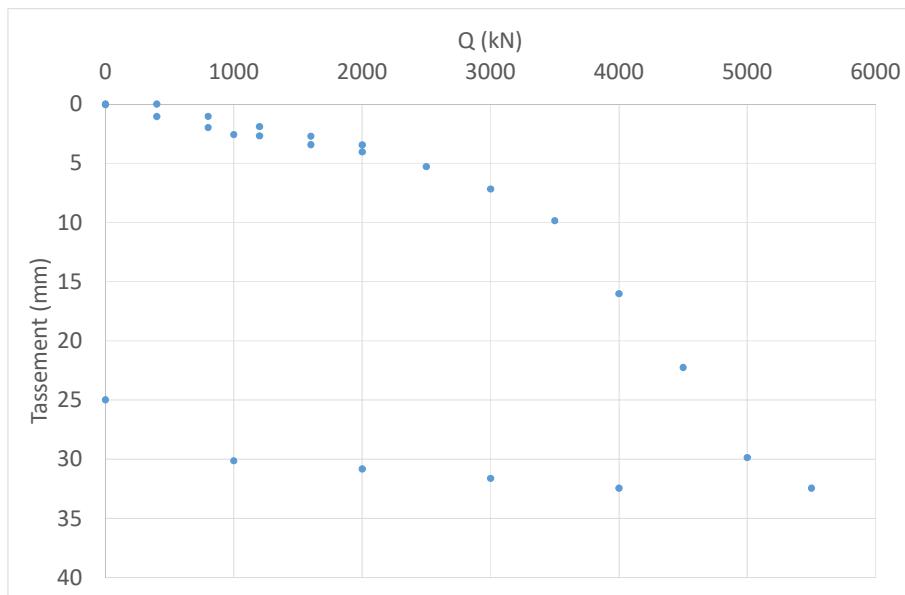


Figure 5. Courbe de chargement

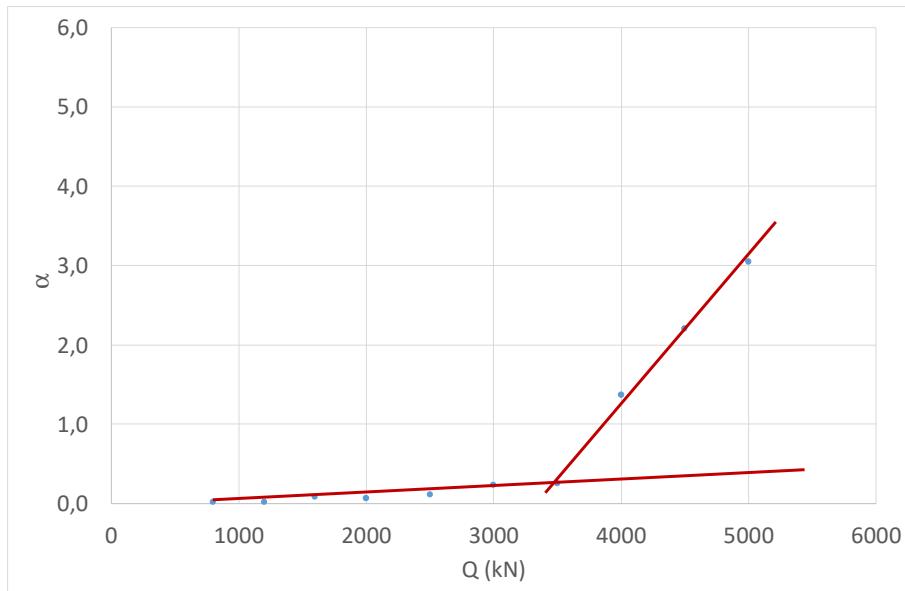


Figure 6. Courbe de fluage

4.2. Analyse des déformations – Détermination de la résistance de pointe et du frottement latéral

La figure 7 présente les déformations mesurées sur le pieu pour les différents paliers de chargement avec la fibre optique et avec les jauge. Pour chaque niveau de jauge, une moyenne entre les deux jauge a été considérée à l'exception de la mesure à 4,35 m de profondeur où une seule jauge 5 a fonctionné. On observe une très bonne corrélation entre les mesures optiques et les mesures des jauge.

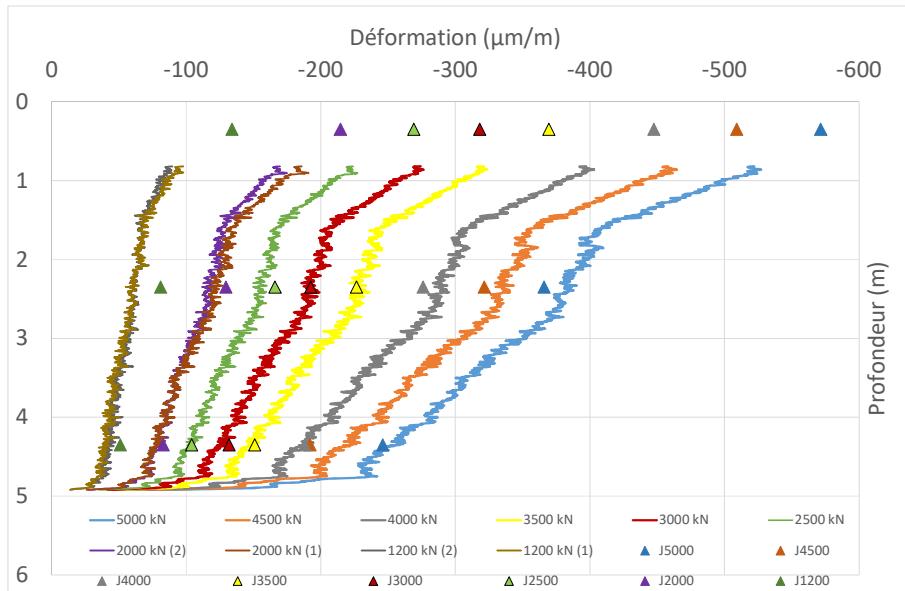


Figure 7. Evolution des déformations dans le pieu pour les différents paliers de chargement

Les mesures de déformation diminuent en valeur absolue avec la profondeur (une déformation négative correspondant à une compression). A partir de la courbe de déformation correspondant au dernier chargement (Figure 7), il est possible de calculer des valeurs de Q_n (Figure 8). Le module utilisé pour le calcul est calé pour que la déformation mesurée en tête corresponde à la charge appliquée. On note que la résistance de pointe est de l'ordre de 3400 kN pour une charge de 5000 kN en tête.

Ensuite les valeurs de contraintes de frottement latéral q_s sont calculées à partir des valeurs de Q_n sur 6 tronçons (Figure 8).

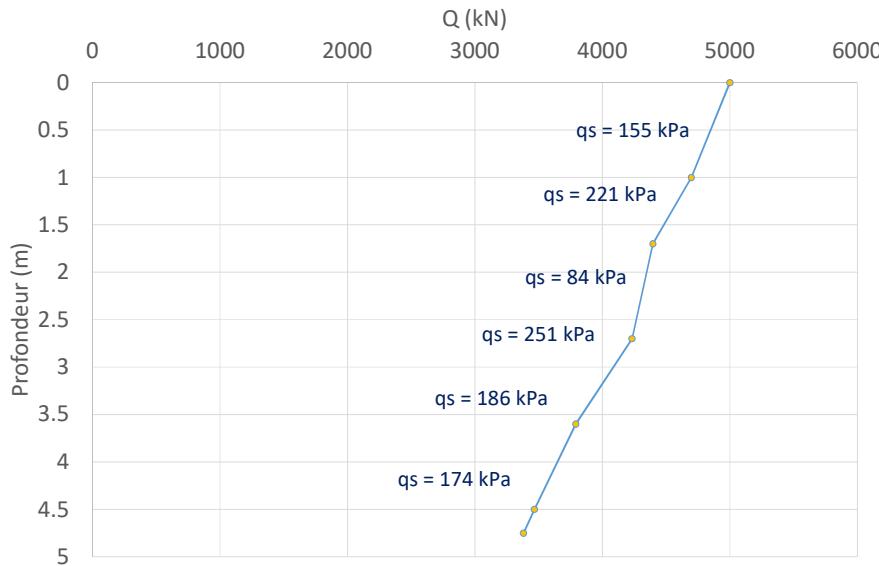


Figure 8. Evolution de la charge dans le pieu et détermination du frottement latéral

4.3. Détermination de la charge limite et la charge de fluage

Le déplacement limite correspondant à 62 mm n'ayant pas été atteint pour les chargements appliqués, il est possible de déterminer la charge limite par la méthode de Chin (Borel et al., 2004). Cette méthode consiste à considérer que la courbe de chargement (Q,s) est de forme hyperbolique et à tracer la courbe de chargement dans les axes hyperboliques ($s/Q, s$). Dans ce repère, la courbe de chargement est linéaire (ou bilinéaire) et il est possible par régression linéaire d'interpoler la courbe de chargement (Q,s) pour des charges supérieures à la dernière charge appliquée lors de l'essai (Figure 9). Par cette méthode, la charge limite est estimée à $Q_{LE} = 6055$ kN et par construction géométrique la charge critique de fluage est estimée à $Q_{CE} = 4010$ kN supérieure à celle déterminée à partir de la courbe de fluage.

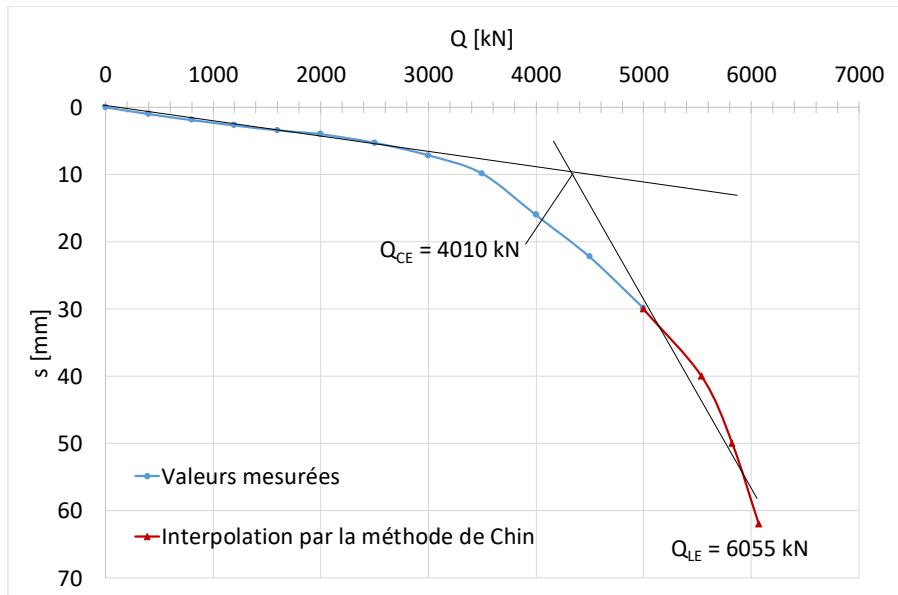


Figure 9. Détermination de la force limite et la force critique de fluage

4.4. Consistance de l'instrumentation

On observe que les mesures par fibres optiques permettent d'obtenir un niveau de précision remarquable grâce notamment à la résolution spatiale millimétrique de la technologie employée.

On observe aussi que les mesures optiques et les mesures par jauge donnent des résultats très similaires pour tous les paliers de chargement. L'utilisation d'une jauge en tête de cage d'armature permet d'obtenir une mesure de déformation à cette profondeur, la fibre donnant des mesures exploitables à partir d'un mètre sous la tête du pieu.

5. Dimensionnement du pieu

Les portances limites estimées par les 2 méthodes pressiométrique et pénétrométrique, d'un pieu tarière creuse de la NF P 94-262 donnent respectivement une valeur de 4071 kN et 4642 kN. En comparant à la portance mesurée du Pieu 3TER de 6055 kN obtenu par la méthode de Chin, une augmentation significative de 30 à 50 % de la portance globale est mise en évidence.

L'instrumentation du pieu par les extensomètres et la fibre optique ont permis également de connaître la distribution entre la pointe et le frottement. Il a été constaté que les augmentations concernent aussi bien la pointe que les frottements le long du fût. Ces résultats alimentent une base de données qui comporte à ce jour 12 pieux testés.

6. Conclusions

Cette planche d'essais s'inscrit dans un programme de développement d'un nouveau pieu tarière creuse type 3 à évent latéral rotatif 3TER®. L'essai de chargement dans les sables et graviers a montré une portance du pieu 3TER® bien plus élevée que le pieu tarière creuse de classe 2 catégorie 6 de la NF P 94-262 (de 30 % avec la méthode pénétrométrique et 50 % avec la méthode pressiométrique). D'autres essais (essais soniques, essais d'impédance, sondage carotté, essais d'écrasement béton, dégarnissage) ont également été réalisés mais les résultats n'ont pas été présentés dans cet article. Ils ont pu permettre de vérifier une très bonne qualité de bétonnage assurant des diamètres réguliers, une absence de défauts verticalement et horizontalement et enfin une mise en œuvre qui n'altère pas les résistances du béton. D'autres essais sur les pieux 3TER® dans les autres types de sol ont permis de rédiger un cahier des charges qui a reçu une EPG (Evaluation Procédés Géotechnique) en 2018 par l'IFSTTAR et le Cerema avec l'appui d'une commission représentative de la profession géotechnique (USG, Syntec, SOFFONS, CNJOG, CNETG, assurance, experts, bureaux de contrôles).

7. Références bibliographiques

- Borel S., Bustamante M. and GIANESELLI L. (2004). An appraisal of the Chin method based on 50 instrumented pile test. Ground Engineering. January 2004.
- NF P 94-150-1 (1991). Essai statique de pieu isolé sous compression axiale.
- NF P 94-262 (2012). Justification des ouvrages géotechniques Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes.