

ARGILE DES FLANDRES : INFLUENCE DU MODE D'INSTALLATION SUR LA REPOSE DES PIEUX

FLANDERS CLAY : INFLUENCE OF INSTALLATION METHOD ON PILE RESPONSE

Alain LE KOUBY¹, Frédéric ROCHER-LACOSTE²

¹ Paris-Est University, GERS-SRO, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France

² DRIEA IF/DiRIF/SIMEER/DIET

RÉSUMÉ – Durant les vingt dernières années, les argiles surconsolidées des Flandres dans le nord de la France ont été le lieu de plusieurs campagnes d'essai de chargement de pieux. On peut notamment citer les campagnes d'essais effectuées dans le cadre des projets de recherche tels que les projets nationaux Vibrofonçage et SOLCYP (SOLlicitations Cycliques sur les Pieux). Différents modes d'installation de pieux ont été testés : les pieux refoulants tels que les pieux aciers battus ouverts et fermés, béton préfabriqués battus, acier vibrofoncés, vissés ainsi que les pieux non refoulant (forés). Des essais de compression et de traction ont été réalisés.

ABSTRACT – During the last twenty years, the Flander overconsolidated clays in the North of France were the place of several pile load tests campaigns. French national research projects such as Vibrodriving and SOLCYP can be mentioned. Different installation methods have been tested: displacement piles such as open and close ended steel piles, steel Vibrodriven pile, screw pile and non-displacement piles (bored). Compression and tension tests were carried out.

1. Introduction

L'argile surconsolidée de Merville a été l'objet de deux campagnes d'essais de pieux dans le cadre des projets de recherche Vibrofonçage et SOLCYP. A ce titre, différents types de pieux ont été testés ; des pieux battus ouverts et fermés, des pieux vibrofoncés, des pieux vissés ainsi que des pieux forés. Les chargements sont de type traction et compression. Une base de données assez exhaustive est donc disponible sur la réponse des pieux dans ce type de matériaux.

Les sites expérimentaux se situent autour de la commune de Merville (59) dans le Nord de la France. Ils se caractérisent par une couverture de limons sableux à argileux de 3 à 5m d'épaisseur dans lequel fluctue la nappe phréatique (-2m à - 3m environ lors des essais) sous laquelle on rencontre la formation d'argile des Flandres, particulièrement homogène sur toute la zone, et d'une épaisseur de 40m environ.

L'argile des Flandres, géologiquement comparable à l'argile de Londres et à l'argile de Boom, s'est déposée il y a 50 millions d'années (Eocène) dans un golfe marin qui couvrait toute la zone Nord de la France, de la Belgique et du Sud Est de l'Angleterre. Elle a été recouverte par des formations tertiaires dont la sédimentation s'est poursuivie jusqu'au Pleistocène supérieur. Le niveau du sol se situait alors probablement à 200m au-dessus du niveau actuel. Les formations sus-jacentes se sont érodées. Le processus d'érosion a été suivi au Quaternaire par le dépôt d'alluvions du Flandrien (Benzaria et al., 2013). L'argile des Flandres a donc été soumise à des cycles de chargement/déchargement et à

des processus périglaciaires qui associés à des phénomènes de cimentation chimique et de vieillissement ont fortement conditionné son degré de surconsolidation (OCR) apparent (Josseaume, 1998)

L'argile des Flandres présente des caractéristiques voisines de celles des argiles de Londres et de Boom (Borel et Reiffsteck, 2006) : faible teneur en eau (de l'ordre de 30%), forte plasticité (IP voisin de 50) et forte fissuration notamment au-delà de 5m de profondeur.

Des essais in situ de type CPT (Cone penetration test ou pénétromètre statique) (Figure 1) et pressiomètre Menard (Figure 2) ont été effectués.

En ce qui concerne les profils de résistance de pointe q_c (CPT), on note une compacité un peu plus élevée dans la zone d'essai du projet Vibrofonçage. En revanche, les valeurs de pression limite obtenues sur les deux sites sont du même ordre de grandeur.

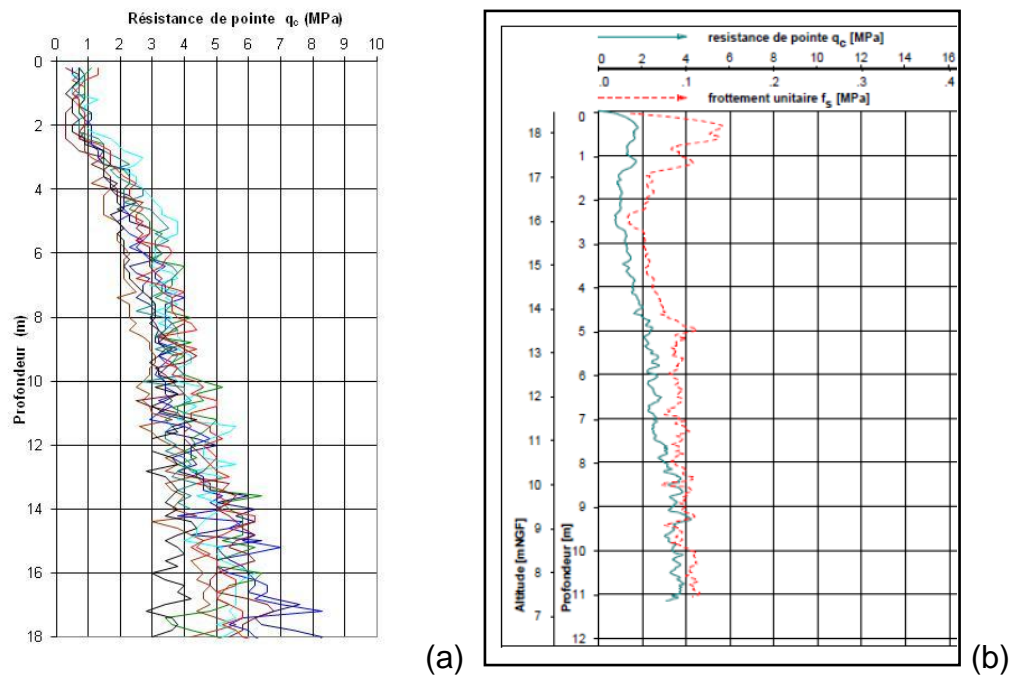


Figure 1. Essais CPT .(a) Vibrofonçage, (b) SOLCYP

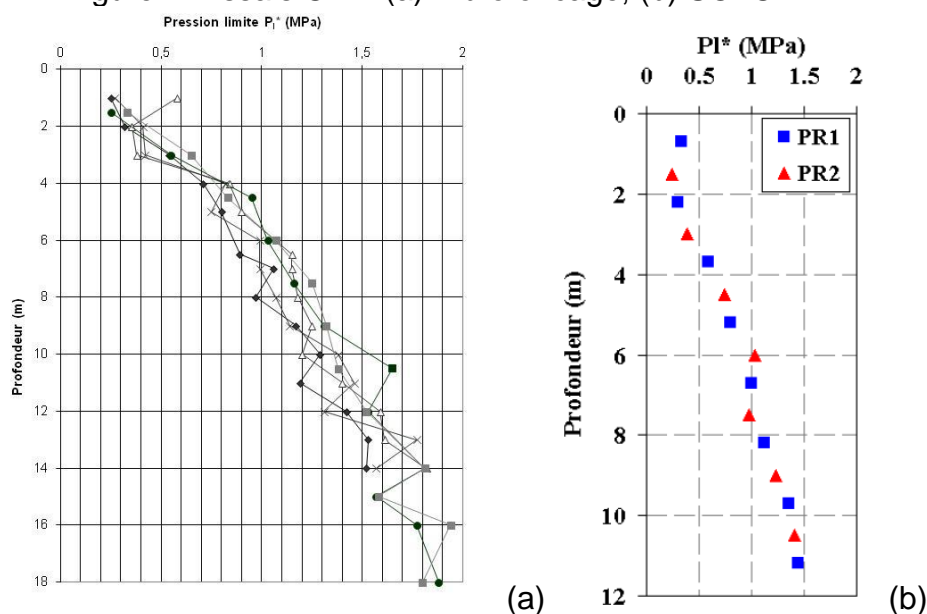


Figure 2. Essais au pressiomètre .(a) Vibrofonçage, (b) SOLCYP

2. Programme d'essai, objectifs et instrumentation

2.1. Programme d'essai et objectifs

Le descriptif des pieux est présenté dans le tableau 1.

Dans le cadre du projet Vibrofonçage, seulement deux pieux ont été retenus pour ce papier. Les profils de résistance (q_c et p_i^* sur les Figures 1 et 2 (a) et (b)) sont équivalents sur les deux projets. Les deux pieux (tube ouvert) du projet Vibrofonçage ont un diamètre de 508 mm et une longueur de 9,3 m pieux. Les quatre pieux battus SOLCYP présentaient un chemisage de 4 m (Figure 4) et une fiche de 9 m dans l'argile des Flandres.

Pour le projet SOLCYP, quatre pieux battus fermés de diamètre 406 mm ont été installés (B1, B2, B3 et B4). De même, deux pieux forés et deux pieux vissés de diamètre 420 mm ont été sollicités sous chargement monotone et sont présentés dans ce papier.

Les pieux battus et vibrofoncés ont été installés par la société IHC. Les pieux en béton (vissé et foré) ont été réalisés par Franki Fondations.

On pourra ainsi comparer la réponse des pieux battus et vibrofoncés, la réponse des pieux battus ouverts et fermés ainsi que la réponse des pieux battus, vissés et forés. Les cas des pieux refoulants et non refoulants sont donc traités ici.

En ce qui concerne les pieux battus, l'analyse comparative des courbes du nombre de coups pour 25 cm d'enfoncement (Figure 3 (a)) et des courbes d'énergie appliquée en tête de pieu (Figure 3 (b)) montre que si on impose une énergie faible on bat plus pour enfoncer de la même profondeur et inversement pour une énergie plus élevée on bat moins. De même, on observe peu de différences entre les pieux ouverts et fermés présentés ici.

Tableau 1. Projet Vibrofonçage et Projet SOLCYP – caractéristiques des pieux

Projet	Référence	ouvert/fermé	Mode d'installation	Type d'essai	Diamètre (D) (mm)	Longueur (L) (m)
Vibrofonçage	tube	ouvert	Battu ouvert (BO)	compression	508	9,3
Vibrofonçage	tube	ouvert	Vibrofoncé ouvert (VO)	compression	508	9,3
SOLCYP	tube B1	fermé	Battu fermé (BF)	compression	406	13
SOLCYP	tube B2	fermé	Battu fermé (BF)	compression	406	13
SOLCYP	tube B3	fermé	Battu fermé (BF)	traction	406	13
SOLCYP	tube B4	fermé	Battu fermé (BF)	traction	406	13
SOLCYP	F1		Foré	compression	420	13
SOLCYP	F3		Foré	traction	420	13
SOLCYP	S1		vissé	compression	420	13
SOLCYP	S2		vissé	traction	420	13

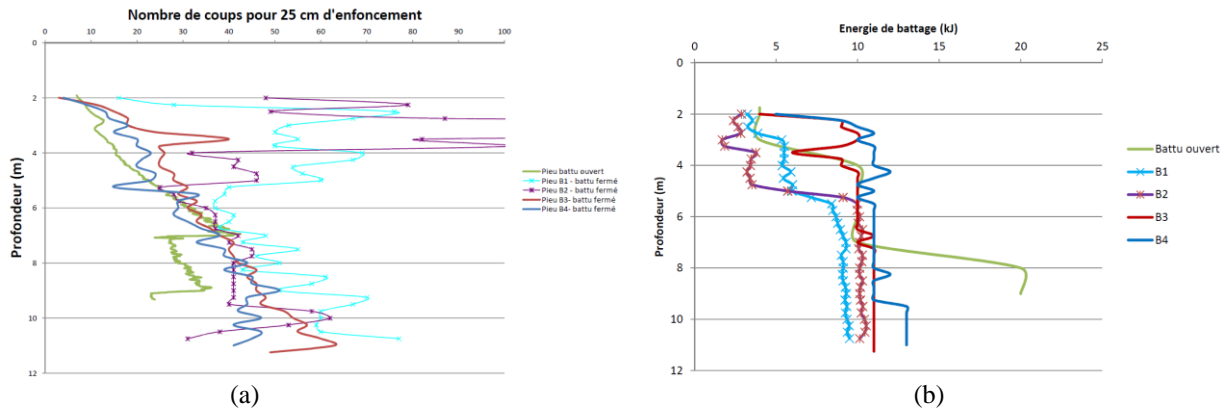


Figure 3. Comparaison entre les pieux ouverts et fermés.(a) Evolution du nombre de coups et (b) Evolution de l'énergie de battage, avec la profondeur pour l'installation des pieux battus.

2.2. Instrumentation des pieux

La méthode d'instrumentation utilisée pour les essais de chargement est la méthode d'essais de pieu avec l'extensomètre amovible.

Elle consiste à utiliser des jauges extensométriques collées sur un ruban métallique placé dans un tube-logement à l'intérieur du pieu. Cette technique assure que les jauges ne subissent pas de sollicitations excessives avant le début de la mesure, ce qui pourrait se produire pour des jauges collées lors du battage ou vibrofonçage d'un pieu métal ou pour des jauges coulées dans le béton lors du coulage ou du séchage du pieu (Rocher-Lacoste et al., 2014). Cette meilleure maîtrise de la mise en œuvre permet de limiter les facteurs d'influence ou d'erreur sur les résultats de mesure. De plus, l'utilisation d'un dispositif amovible offre une grande souplesse car les jauges sont réutilisables et interchangeables.

La figure 4 montre un schéma descriptif de l'instrumentation des pieux ainsi qu'une photo de l'extensomètre amovible et son montage avant mise en place dans un pieu (Le Kouby et al., 2012). Par exemple, dans le projet SOLCYP, pour chacun des types de pieux, 12 niveaux de jauges ont été prévus, un premier tronçon de 1 m en tête de pieu, un dernier tronçon de 1 m à proximité de la pointe puis 10 autres tronçons de 1 – 1,40m de long en fonction des cas.

Dans le cas du pieu battu, étant donné qu'un préforage de 4 m a été réalisé pour guider l'installation des pieux battus fermés, l'instrumentation installée dans les 4 premiers tronçons n'est pas pris en compte car il n'y a pas de frottement mobilisé sur ces quatre mètres.

Les pieux avaient un diamètre respectivement de 406 mm pour les pieux battus et de 420 mm pour les pieux bétons. Le schéma d'instrumentation choisi pour les pieux battus est tel que deux tubes en acier fermés ont pu être soudés au tube métallique battu (figure 4) afin d'introduire deux chaînes extensométriques dans le pieu et ainsi faire une moyenne des déformations mesurées. Le tube en acier fermé devait être installé avec la cage de ferrailage pour les pieux bétons et il n'y avait la place que pour un tube extensométrique au centre du pieu.

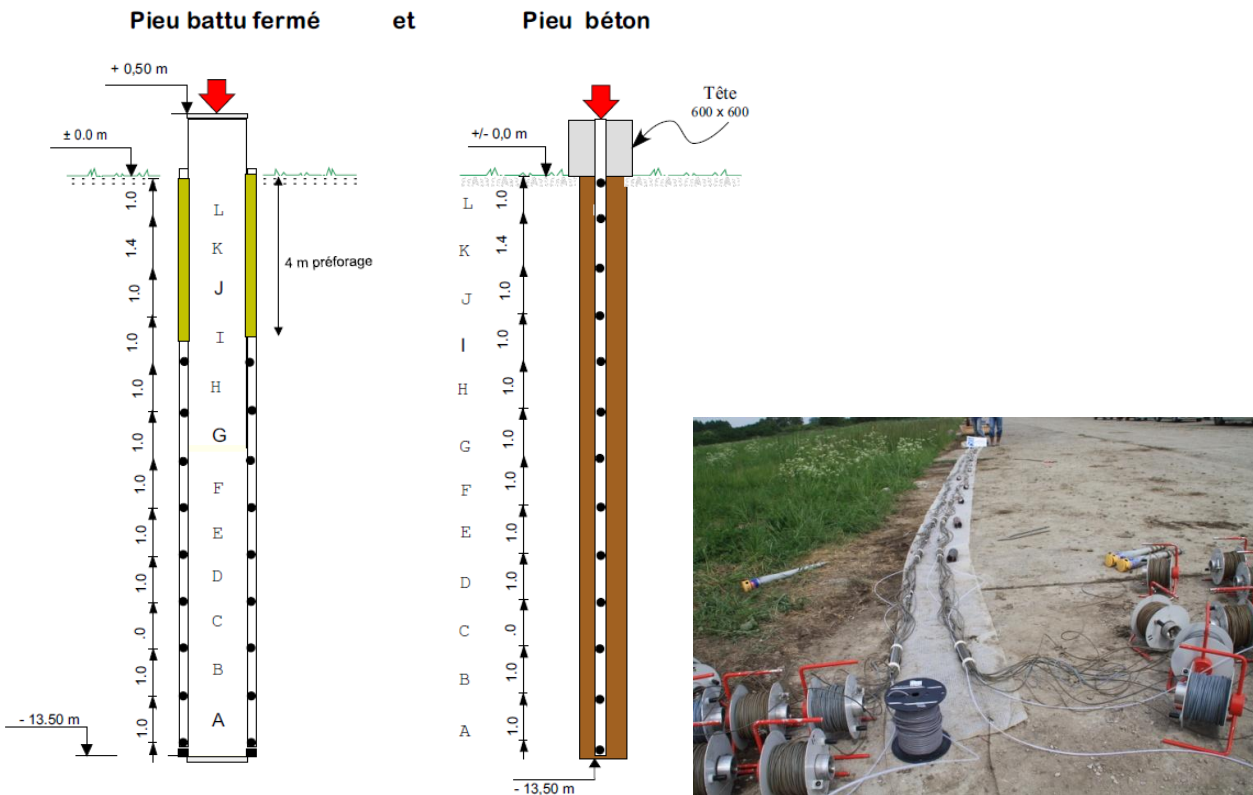


Figure 4. Principe de l'extensomètre amovible.

3. Résultats des essais de chargement

3.1. Capacité portante

Comme cela a déjà été montré dans Vibrofonçage 2006, la capacité portante d'un pieu vibrofoncé est inférieure à celle d'un pieu battu (figure 5 (a)). De même, la portance d'un pieu battu fermé (de diamètre 406 mm) est supérieure à celle d'un pieu battu ouvert (de diamètre 508 mm). Dans le cas du pieu ouvert, le bouchon formé par le sol ne permet probablement pas de mobiliser une résistance en pointe équivalente à celle du pieu battu fermé. De même, le fort refoulement en pointe de pieu battu fermé fait que les derniers tronçons doivent reprendre des efforts très supérieurs à ceux du pieu ouvert.

Les quatre pieux battus SOLCYP sont tels que les pieux B1 et B3 ont subi respectivement un essai monotone en compression et en traction suivant les normes AFNOR NF-P94150-1 (compression) (1999a) ou 94150-2 (traction) (1999b) au début de leur histoire de chargement. Les pieux B2 et B4, respectivement sollicités en compression et traction, ont d'abord subi des séquences de chargement cycliques qui ont peu déformé les pieux et les chargements monotones appliqués sont différents de ceux recommandés dans les normes avec des paliers de chargement de trois minutes soit une vitesse de chargement 20 fois supérieure à celles des essais classiques.

Dans le cas du chargement en compression, on remarque une portance du pieu B2 supérieure à celle de B1 probablement due à l'effet positif de la vitesse de chargement dans les argiles. En revanche, dans le cas de la traction, on ne retrouve pas cet effet pour le pic ou effort maximum.

La dégradation de la portance due aux cycles est donc compensée par la vitesse de chargement.

La portance des pieux en traction est bien inférieure à celle de la compression en raison de la résistance en pointe seulement présente dans le cas de la compression.

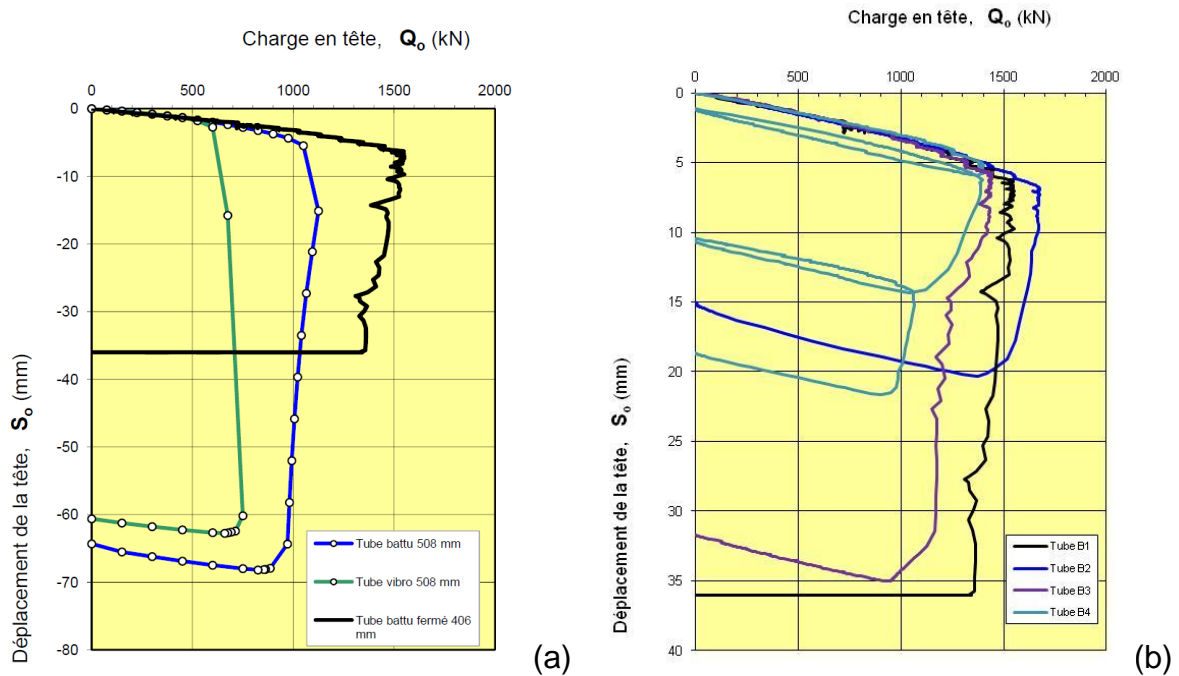


Figure 5. Courbe Déplacement – charge (a) comparaison pieux battus ouvert, fermé et vibrofoncé, (b) comparaison entre les quatre essais effectués sur les quatre pieux SOLCYP (B1, B2, B3 et B4).

3.2. Comportement local

Les figures 6 à 9 montrent les mesures locales de frottement latéral effectuées le long du pieu pendant les essais de chargement.

Sur la figure 6, les frottements latéraux maximums mesurés le long du pieu sont supérieurs dans le cas du pieu battu comme on pouvait s’y attendre mais on constate une plus grande dispersion des frottements latéraux mesurés dans le cas des pieux battus. Néanmoins, on remarque que pour les figures 6 à 9, le plus grand nombre de tronçons est compris dans un fuseau qui constitue un intervalle de 1/3 de la valeur du frottement maximum (par exemple 50-80 kPa et 35-50 kPa respectivement pour la Figure 6 (a) et (b)). Les différences pourront être faites en comparant les frottements maximums.

Dans le cas des pieux battus fermés, pour la compression, la plupart des tronçons forme un fuseau proche du frottement maximum. Seulement les deux tronçons les plus proches de la surface montrent des valeurs plus faibles. Néanmoins, la distribution des frottements est plus régulière dans le cas de la traction traduisant probablement l’influence de la profondeur et donc des contraintes normales sur le frottement mesuré le long du pieu. Les valeurs maximales obtenues en compression et traction sont toutefois du même ordre de grandeur (figure 7).

Les pieux vissés (figure 8) montrent les mêmes spécificités que les pieux battus avec dans le cas de la compression un fuseau assez serré des frottements mesurés le long du pieu. La traction montre un frottement latéral maximum supérieur à celui de la compression mais une distribution des frottements plus régulière le long du pieu et une influence de la profondeur du tronçon.

Le cas des pieux non refoulants (pieux forés, figure 9) est également significatif avec des courbes de mobilisation de frottement latéral qui forment également un fuseau assez serré autour de la courbe atteignant la valeur maximale. Les courbes de mobilisation montrent bien que les frottements maximums mobilisés sont bien inférieurs à ceux obtenus dans le cas de pieux refoulants (battu, vibrofoncé et vissé). Les courbes de mobilisation en traction montrent de nouveau une distribution plus régulière le long du pieu.

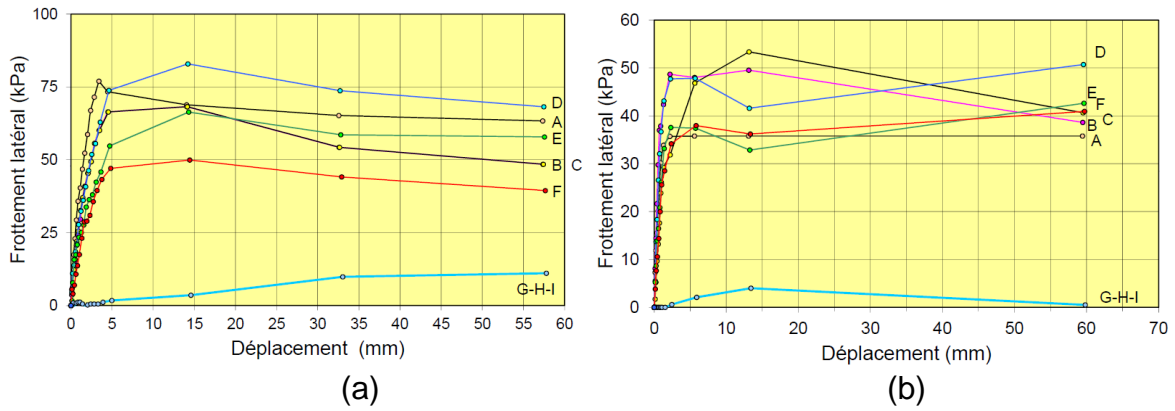


Figure 6. Tube 508 (a) battu ouvert, (b) vibrofoncé

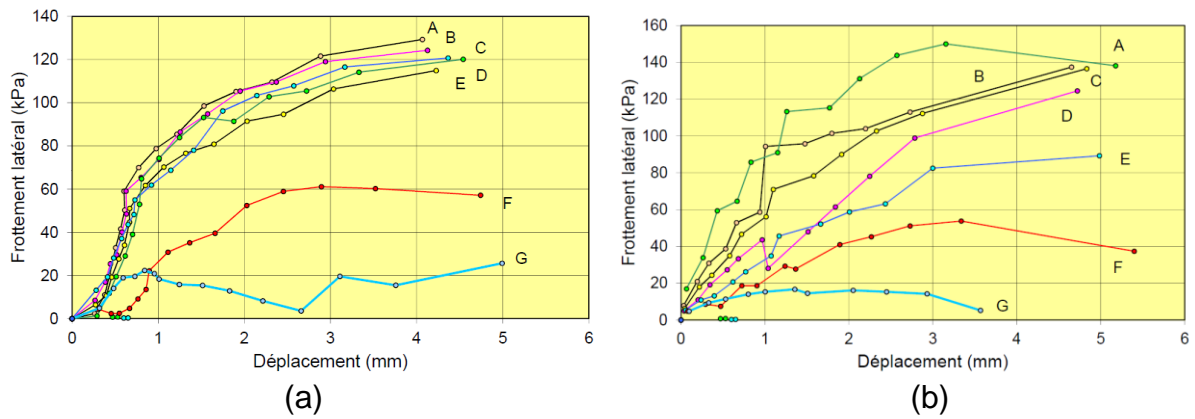


Figure 7. Tube 406 battu fermé – (a) B1 compression, (b) B3 traction

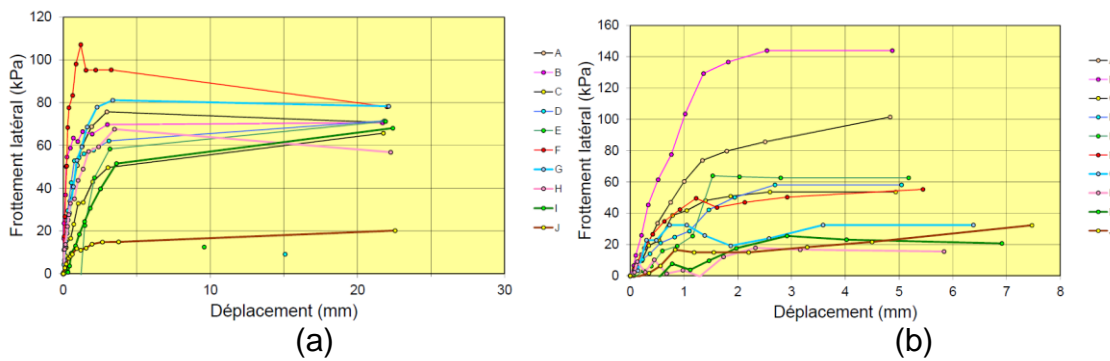


Figure 8 Pieu vissé 420 mm – (a) S1 compression, (b) S2 traction

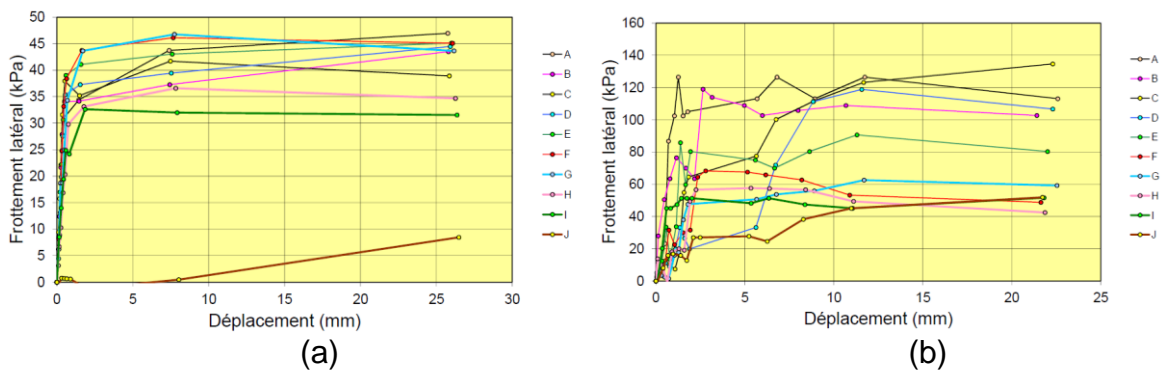


Figure 9 Pieu foré 420 mm (a) F1 – compression, (b) F3 - traction

Les frottements latéraux mesurés lors de l'essai de traction du pieu F3 sont très supérieurs à ceux mesurés sur le pieu F1 (essai de compression). Ces différences peuvent être dues à des différences dans les paramètres de forage et au fait que le pieu F3 a subi des séquences de chargement cyclique avant la réalisation de l'essai de chargement monotone. Ces trois modes d'installation semblent montrer, qualitativement, le même type de réponse en traction et en compression.

4. Conclusions

Le site de Merville a permis de tester la réponse de différents types de pieu sur une géologie assez homogène, une argile surconsolidée dans le cadre de deux projets de recherche : Vibrofonçage et SOLCYP.

Les résultats ont montré une différence de l'ordre de 30 % entre les frottements mobilisés pour un pieu battu ouvert et un pieu vibrofoncé (Figure 6). Les frottements mobilisés sur un pieu battu fermé sont 30 % supérieurs à ceux mobilisés sur un pieu battu ouvert (Figure 7). De même, la comparaison entre les pieux refoulants (battu, vibrofoncé et vissé) et non refoulant (foré) a mis en évidence une différence de réponse. Les pieux battus fermes présentent des frottements mobilisés supérieurs de l'ordre de 30-40 % à ceux des pieux vissés et de l'ordre de 60 % par rapport aux pieux forés.

En outre, une différence significative existe entre la réponse des pieux soumis à un chargement de compression et de traction pour des pieux courts (rapport L/D entre 18 et 32). En effet, les courbes de mobilisation du frottement latéral forment, pour la plupart, un fuseau assez serré autour du maximum pour la compression alors que dans le cas de la traction, une distribution plus uniforme en fonction de la profondeur est observée. Les valeurs de frottement maximum mobilisées pour les deux sens de chargement ne sont pas très différentes dans tous les cas étudiés.

Il serait intéressant de voir dans quelle mesure, ces différences de mobilisation du frottement latéral pour des valeurs de pression limite identiques mesurées sur un site, peuvent avoir une influence sur le calcul des pieux.

5. Références bibliographiques

- AFNOR (1999a) NF P94-150-1 Essai statique de pieu isolé sous effort axial en compression. 29p.
- AFNOR (1999b) NF P94-150-2 Essai statique de pieu isolé sous effort axial en traction. 26p.
- Benzaria, O., Puech, A., Le Kouby, A. (2013). Essais cycliques axiaux sur des pieux forés dans une argile surconsolidée. . Actes, Congrès international de Mécanique des Sols et de Géotechnique, Paris, septembre 2013, pp. 2327-2330.
- Borel S. and Reiffsteck P. 2006. Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. Géotechnique et Risques Naturels, LCPC, GT81.
- Josseume H. 1998. Propriétés mécaniques de l'argile des Flandres à Dunkerque et Calais. Revue Française de Géotechnique, N°84 .
- Le Kouby, A., Rocher-Lacoste, F. (2012). Effect of Cyclic Axial Loading on the Distribution of Load along a Pile. ASCE Special Publication n°227, pp. 436-451.
- Rocher-Lacoste, F., Le Kouby, A., Dudouyt, F. (2014). Essai statique de pieu isolé instrumenté avec la technique de l'extensomètre amovible , sous charge axiale, méthode d'essai IFSTTAR ME68, 45p.
- Vibrofonçage. (2006). Guide technique. 382 pages.