

QUELQUES RETOURS D'EXPERIENCE CONCERNANT LES PIEUX BATTUS OUVERTS DE GRANDE DIMENSION

SOME FEEDBACK CONCERNING LARGE-SIZED OPEN DRIVEN PILES

Zaky Babaroudj¹, Mathilde Brun², Audrey Charruault³ et Sébastien Burlon²

¹ CGG, Massy, France

² Terrasol (groupe Setec), Paris, France

³ Eiffage, Vélizy, France

RÉSUMÉ – A partir de différents retours d'expérience, cet article a pour objectif de dresser un état de l'art de trois problèmes fondamentaux qui peuvent se poser lors du dimensionnement de pieux battus ouverts : le calcul de la capacité portante, l'analyse des essais de chargement statiques et dynamiques afin de définir des critères d'arrêt de battage, ainsi que les procédures pouvant être adoptées pour atteindre les portances souhaitées.

ABSTRACT –Based on various feedbacks, this article aims to provide a state-of-the art on three fundamental problems that may arise during the design of open driven piles: the prediction of the bearing capacity, the analysis of both static and dynamic loading tests in order to define driving criteria, the procedures that can be adopted in order to increase the bearing capacity.

1. Introduction

Ces dernières années ont vu le développement significatif d'infrastructures portuaires et maritimes nécessitant l'installation de fondations profondes de type pieux métalliques battus. Du fait de l'importance croissante de ces projets, les fondations gagnent elles aussi en dimension et il n'est plus rare que les pieux mis en œuvre atteignent des diamètres variant de 1200 à 1600mm.

Dans un tel contexte, les ingénieries s'inspirent de plus en plus des pratiques « offshore » déjà éprouvées par les industries pétrolières et éoliennes, tout en gardant à l'esprit les spécificités liées au domaine « nearshore », à savoir généralement de faibles hauteurs d'eau (< 15m) et des longueurs de fiches modérées (< 20m).

A partir de différents retours d'expérience, cet article a pour objectif de dresser un état de l'art de trois problèmes fondamentaux qui peuvent se poser lors du dimensionnement de tels pieux :

- le calcul de la capacité portante des pieux en phase projet au moment où aucun essai de chargement n'est disponible : différentes méthodes de calcul sont comparées (NF P 94-262, API, etc.), et la notion de bouchon est abordée.
- l'analyse des essais de chargement dynamique et statique permettant d'évaluer la capacité portante des pieux et de définir des critères d'arrêt de battage : différents aspects sont discutés comme la relation entre la portance R_c , l'énergie de battage E et le nombre de coups N par unité de longueur.
- les procédures à adopter lorsque le terrain dans lequel le pieu est battu ne permet pas d'atteindre pour des profondeurs raisonnables les portances souhaitées : la mise en place de diaphragme et l'utilisation d'un matériau de remplissage préalable au battage sont évoquées.

2. Calcul de la capacité portante des pieux en phase projet

2.1. Quelques considérations physiques préliminaires

Un premier point à rappeler pour le calcul de la capacité portante des tubes métalliques ouverts est la forte influence du mode de mise en place: vibrofonçage, battage, ou bien encore forage dans la cas de fondation au rocher (ce dernier cas n'étant pas développé dans le présent article).

Le vibrofonçage est un procédé de mise en œuvre rapide et efficace, majoritairement adapté aux sols meubles, mais induisant des paramètres de résistance de frottement et de pointe moindres que ceux obtenus lors du battage. La norme NF P 94-262 donne, sur la base du Projet National Vibrofonçage, des recommandations sur les paramètres de dimensionnement.

Le battage constitue sans aucun doute le mode de mise en place le plus courant. Moyennant un juste choix du marteau, il s'adapte à tous types de sol, voire sous certaines réserves, à des roches tendres/fracturées. Lors du battage d'un pieu, le sol encaissant se voit modifié de par le refoulement engendré par le procédé. La Résistance du Sol au Battage (R_{SB}) se distingue de la capacité portante long terme (R_c) ; on peut alors définir le coefficient de cicatrisation des sols comme le rapport R_c/R_{SB} .

Dans la grande majorité des cas, le coefficient de cicatrisation est supérieur à 1 : la capacité portante est minimale juste après la mise en place du pieu et croît avec le temps. La cause de ce phénomène, qui touche plus particulièrement les sols fins argileux est souvent associée à la génération de suppressions interstitielles durant la mise en place du pieu qui tendent à faire décroître les contraintes effectives et donc le cisaillement mobilisable à l'interface entre le fût et le terrain. L'augmentation de portance sous l'effet du temps est donc plus prononcée dans un terrain lâche qui tend à se contracter lors de la mise en place du pieu. Une autre cause de ce phénomène est la « cicatrisation » du terrain, notamment dans les terrains sédimentaires présentant une cohésion ou une cimentation : la craie ou certains sables grésifiés sont typiques de ce type de terrain.

Il est important de noter que quelques terrains comme les sols cimentés, ou ceux présentant des teneurs élevées en $CaCO_3$ (sables carbonatés, certains sables grésifiés comme ceux de la région de Laayoune ou de Dakhla en Afrique, sols coralliens, roches calcaires ou encore la craie) ont des comportements très atypiques lors du battage. Dans ces matériaux, le battage induit un remaniement à l'interface sol/pieu ou bien encore fracture la cimentation existante si bien que le frottement obtenu lors de la mise en œuvre est très faible, avec peu ou pas de cicatrisation.

Enfin à l'inverse, citons le phénomène de relaxation des sols, qui bien que moins largement répandu/documenté que la cicatrisation, peut toucher les sables limoneux moyennement denses à denses.

Le second point concerne le mécanisme de mobilisation de la pointe : lors du battage, deux phénomènes peuvent être observés (Figure 1) : celui carottant où tout le terrain traversé rentre dans le pieu et celui bouchonnant où le terrain ne rentre plus totalement dans le pieu. Des comportements intermédiaires peuvent aussi être observés.

Le cas carottant indique que la résistance de pointe du pieu est très faible : les frottements entre le terrain à l'intérieur du tube et le tube sont trop faibles pour équilibrer toute réaction à la base du pieu. Le cas bouchonnant indique le contraire à savoir que les frottements entre le terrain à l'intérieur du tube et le tube sont suffisants pour équilibrer une réaction à la base du pieu.

Le frottement mobilisable entre le terrain ayant pénétré dans le pieu et le pieu est très difficile à quantifier car il est lié au foisonnement de ce dernier dans le pieu. Un foisonnement important tend à accroître la contrainte horizontale dans le terrain pénétrant dans le pieu et donc à augmenter le cisaillement mobilisable à l'intérieur du pieu.

A noter également que les comportements (carottant/bouchonnant) en conditions dynamiques ne sont pas toujours les mêmes qu'en statique : si un pieu bouché au battage aura bien un comportement bouché en statique, il n'en n'est pas de même d'un pieu carottant en dynamique, qui peut tout aussi bien se comporter carottant ou bouchonnant en statique.

Ces différents points font qu'une analyse spécifique est requise pour estimer la capacité portante d'un pieu battu ouvert.

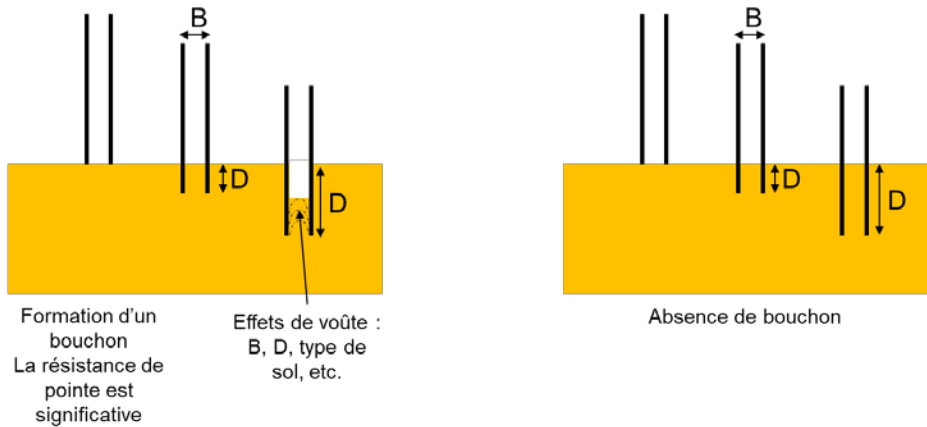


Figure 1. Comportement schématisé d'un pieu bouchonnant (à gauche) et carottant (à droite)

2.2. Les recommandations de la norme NF P 94-262 et des autres normes

La base de données ayant permis de contribuer à l'étalonnage des paramètres de calcul de cette norme comprend des pieux battus ouverts présentant un diamètre compris entre 500 et 800 mm généralement (Baguelin et al., 2012 et Burlon et al., 2014).

Les pieux battus ouverts couverts par la norme présentent également des profondeurs de pénétration en général supérieures à 15 diamètres: on peut dans ces conditions supposer qu'un bouchon au moins partiel s'est formé.

Les frottements axiaux $q_{s,i}$ dans chaque couche ainsi que les facteurs de portance k_p et la contrainte de rupture à la base du pieu q_b sont donc respectivement associés à la surface latérale extérieure du pieu et l'aire totale A_b de la base du pieu (c'est-à-dire, la somme de l'aire A_c de l'anneau d'épaisseur e constituant le pieu et de l'aire du disque intérieur du pieu - Figure 2 - gauche) :

$$R_c = R_b + R_{S;ext} = A_b q_b + \sum_{i=1}^n \pi B_e h_i q_{s,i}$$

$$A_b = \pi B_e^2 / 4$$

Le facteur de portance k_p fourni par la norme NF P 94-262 tient compte du fait que c'est bien l'aire totale du pieu A_b qui est considéré. Ce facteur est par conséquent plutôt modéré de l'ordre de 1,0 en comparaison de ceux proposés pour un pieu battu fermé qui atteignent 2,0 voire 3,0.

Quand le diamètre du pieu dépasse 800mm, et a fortiori pour des fiches estimées faibles (<15 diamètres), d'autres modèles de calcul doivent être mis en œuvre pour anticiper le fait que le pieu puisse avoir un comportement carottant. Dans ce cas, les équations suivantes peuvent être utilisées comme suggéré par les normes et les recommandations relevant du domaine « off-shore » (Norme européenne ISO 19901-4 : 2016) - (Figure 2 - droite) :

$$R_c = R_{b,c} + R_{S;ext} + R_{S,int} = A_c q_b + \sum_{i=1}^n \pi B_e h_i q_{s,i} + \sum_{j=1}^n \pi (B_e - 2e) h_j q_{s,j}$$

$$A_c = \pi e (B_e - e)$$

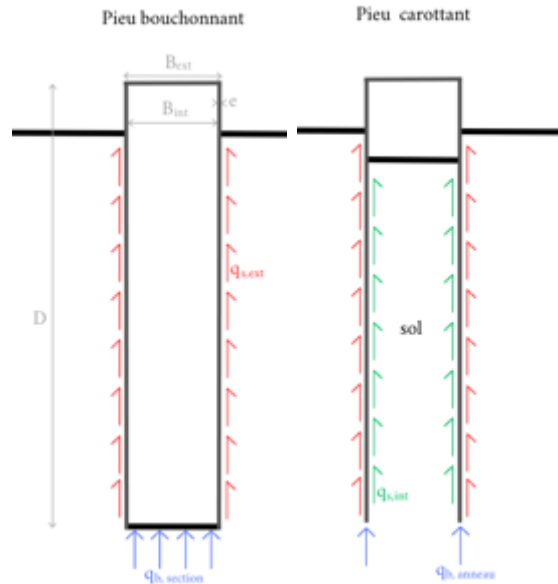


Figure 2. Termes de pointe et de frottement pour un pieu bouchonnant (à gauche) et pour un pieu carottant (à droite)

Dans les deux modèles, l'enjeu crucial est donc l'estimation du terme R_b sur l'aire totale du pieu (pour le cas bouchonnant) ou du terme $R_{s,int}$ (pour le cas carottant) car ils dépendent de la nature du terrain pénétrant dans le pieu, du foisonnement du terrain dans le pieu lui-même, des propriétés de contractance et de dilatance du terrain et de la profondeur de pénétration du pieu (c'est-à-dire la hauteur sur laquelle le terrain pénètre dans le pieu).

A défaut de mesures expérimentales permettant d'estimer séparément les termes $R_{s,ext}$ et $R_{s,int}$, on peut supposer en première approche d'une phase d'étude que $R_{s,int} = R_{s,ext}$. Une certaine prudence est toutefois de mise sur la prépondérance du terme $R_{s,ext}$ dans l'estimation de la capacité portante. En effet, certains travaux de recherche menés sur des essais de pieux instrumentés montreraient que le frottement interne ne s'appliquerait que sur une hauteur de l'ordre de 20% à 30% de celle du bouchon de sol (Sangseom Jeong et Junyoung Ko, 2015).

Il faut donc admettre que les recommandations de la norme NF P 94-262 pour le calcul de la portance des pieux battus ouverts ne sont pas suffisantes notamment quand le diamètre des pieux est supérieur à 0,8 m et que la longueur de fiche est limitée (<15 diamètres). Pourtant, les structures que supportent ces fondations sont de plus en plus sensibles et exigent une estimation précise des tassements et raideurs des pieux supports. Dans ce contexte, des essais de chargement dynamique, voire dans la mesure du possible si cela est économiquement viable et nécessaire pour les besoins du projet, des essais de chargement statique, sont recommandés.

3. Analyse des essais de chargement dynamique et statique

3.1. Objectifs et utilisation des essais

Lors d'un projet où des pieux battus sont mis en place, des essais de chargement dynamique (on entend par là instrumentation du pieu et procédure de calage des signaux recueillis) et statique peuvent être mis en œuvre. Ces essais répondent à des objectifs assez différents.

Mené à la rupture, l'essai de chargement statique fournit une mesure quasi directe de la résistance ultime mobilisable par la fondation. Si le pieu est instrumenté, il est également possible de distinguer la part de résistance en pointe de la part de frottement latéral développé au sein de chaque couche. Pour des pieux de grands diamètres supportant des

charges de plusieurs centaines de tonnes, la réalisation de tels essais jusqu'à la rupture devient très complexe, onéreuse, voire même impossible dans le domaine maritime.

L'essai de chargement dynamique fournit quant à lui une estimation de la résistance de sol mobilisée au moment de l'essai.

Celle-ci est obtenue lors d'une analyse itérative de calage de signal consistant à déterminer les frottements axiaux $q_{s,i}$ dans chaque couche et la contrainte de rupture à la base du pieu q_b par comparaison entre un signal mesuré lors de l'essai de chargement dynamique et un signal calculé par le logiciel. Malgré leurs différences, les résultats de ces deux essais peuvent néanmoins remarquablement converger pour peu qu'une attention particulière soit portée aux points suivants :

- La portance déduite d'une analyse de calage n'est une évaluation que de la résistance de sol activée lors du choc, qui peut être inférieure à la résistance maximale mobilisable. Pour que ces deux valeurs coïncident, il faut en effet que le marteau de battage sélectionné soit suffisamment puissant pour mobiliser la totalité de la résistance du sol (ce qui est généralement le cas lorsque l'enfoncement du coup est supérieur à 3 mm) ;
- Comme évoqué plus haut, dans certains cas, le battage modifie l'interface sol/pieu si bien que la Résistance du Sol au Battage n'est pas égale à la résistance ultime R_c . Pour que ces deux valeurs coïncident, les surpressions interstitielles générées lors de la mise en œuvre doivent avoir eu le temps de se dissiper. On pourra donc, au choix, analyser un coup de fin de battage, fournissant ainsi la valeur de Résistance du Sol au Battage, ou un coup sélectionné en début de surbattage, assimilable à la résistance ultime mesurée par un essai statique.

Si l'évaluation de la portance du pieu grâce aux résultats d'une analyse de calage fournit une information primordiale, l'analyse détaillée de la fiche de battage, à savoir l'évolution du nombre de coups avec la profondeur, en fonction de l'énergie délivrée par le marteau, donne, elle aussi, des informations précieuses. Elle permet notamment de mettre en évidence des contrastes de raideur des couches traversées, mais aussi de comparer le comportement de divers pieux entre eux ou encore de repérer des zones du terrain dans lesquelles il est possible de fonder le pieu.

La Figure 3 propose un exemple tiré d'un site réel où l'on observe la variation du nombre de coups N avec la profondeur pour 2 pieux testés. On remarque qu'à partir de la cote -34 mZh le nombre de coups augmente notablement, signalant la présence d'une couche de compacité plus élevée pouvant servir d'ancrage aux pieux.

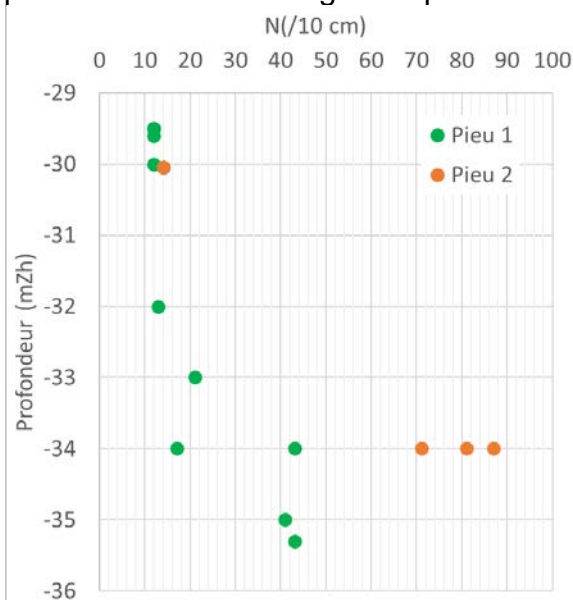


Figure 3. Evolution de la Résistance du Sol au Battage en fonction du nombre de coups avec la profondeur

3.2. Utilisation conjointe des données de battage et des essais de chargement dynamique

Il est possible d'établir un lien propre au site d'étude entre nombre de coups N nécessaire à un enfoncement (souvent 10 ou 25 cm) du pieu, énergie de battage E délivrée par le marteau sélectionné, et R_{SB} . Il peut être défini de manière théorique via une simulation de battage au stade avant-projet, puis mis à jour pendant l'exécution grâce à l'analyse des pieux instrumentés par PDA (« Pile Driving Analyzer »). Ce lien peut ensuite être utilisé pour évaluer la capacité portante des pieux battus non instrumentés, et définir des critères d'arrêt de battage.

Il existe plusieurs modes de représentation de ce lien. On présente sur la Figure 4 ci-dessous l'évolution de la capacité portante R_{SB} en fonction du nombre de coups N à énergie fixe E . Il apparaît en particulier que la portance ne varie pas linéairement avec le nombre de coups N .

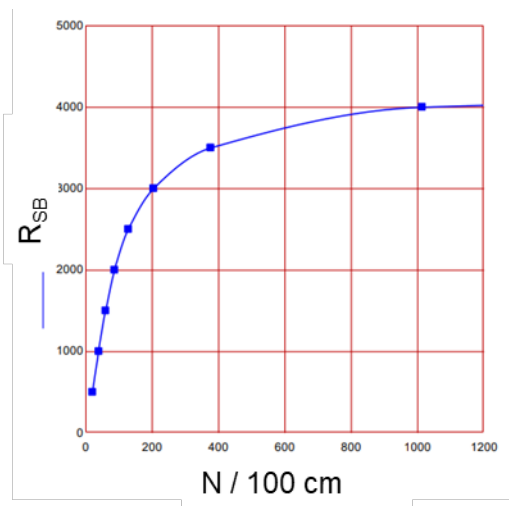


Figure 4. Variation de la capacité portante R_{SB} en fonction du nombre de coups

Afin d'optimiser la durée du battage, de préserver l'intégrité du pieu et du marteau, il y a donc un enjeu fort à ne pas se contenter « d'aller au refus » pour valider la portance d'un pieu, mais plutôt d'analyser l'interaction sol/pieu/marteau pour définir un critère d'arrêt de battage pertinent.

Il peut être intéressant de reporter dans un graphique les couples de points (N , E) en les associant R_{SB} (ou R_c si un essai de chargement a permis d'établir une corrélation). Un exemple est fourni en Figure 5 où l'on s'est préalablement assuré que les couples (R_c , N) étaient associés au même niveau d'énergie. Un tel graphique permet de contrôler la cohérence des différentes données fournies par le suivi de battage et les essais de chargement dynamique.

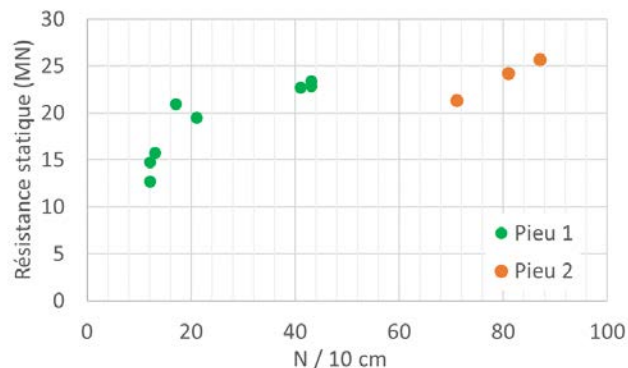


Figure 5. Evolution de de la capacité portante R_c selon le nombre de coups

Afin de faciliter le suivi de battage sur site et d'obtenir en quasi instantanée la portance des pieux battus, il est également possible de fournir au chantier un faisceau de courbes communément appelées « inspector chart » : chaque courbe retrace, pour une unique valeur de portance, l'évolution du nombre de coups en fonction de l'énergie délivrée par le marteau. On obtient une relation de la forme suivante :

$$E \cdot N = k \cdot R_c^\alpha$$

où k et α sont deux paramètres associés au site.

Il est ainsi possible d'évaluer la portance du pieu en ne connaissant que le nombre de coups et l'énergie délivrée en fin de battage.

Un exemple est proposé sur la Figure 6 : un 1^{er} faisceau est établi sur la base d'une succession de simulations de battage. Les courbes sont ensuite recalées au fil du chantier en fonction des résultats des essais dynamiques menés. Par simple lecture graphique, on déduit dans le cas présent que la capacité portante d'un pieu battu avec 25 coups/10cm à 270 kJ sera de l'ordre de 17 à 18 MN.

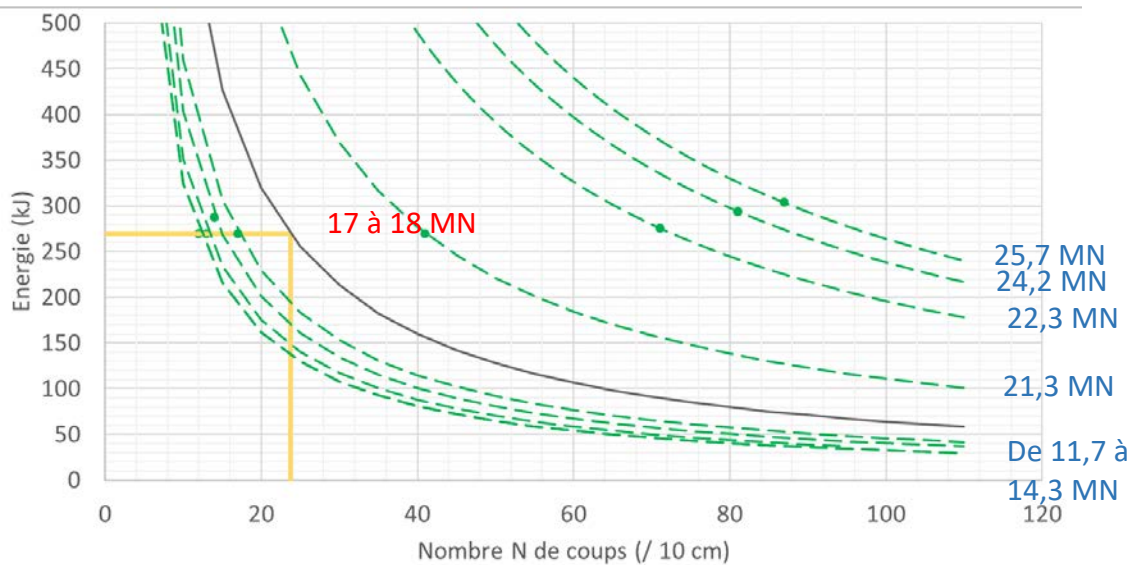


Figure 6. Courbe d'isoportance en fonction de (N, E)

4. Procédures alternatives au pieu battu ouvert

Quand il s'avère délicat de justifier la portance d'un pieu battu ouvert avec une longueur raisonnable, il est possible de mettre en œuvre différents procédés permettant de favoriser l'apparition d'un comportement bouchonnant. Classiquement, deux procédés peuvent être mise en œuvre : l'un repose sur un pré-remplissage du pieu et l'autre sur la mise en place d'un diaphragme dans le pieu.

La technique du pré-remplissage consiste simplement à limiter la pénétration du terrain dans le pieu et donc à favoriser la formation d'un bouchon. Elle peut aussi être mise en œuvre durant le battage auquel cas le remplissage peut se faire avec un béton de remplissage. Dans tous les cas, un essai de chargement statique doit être mis en œuvre pour valider le procédé.

La mise en place d'un diaphragme consiste à insérer une pièce métallique ou en béton dans le pieu laissant passer l'eau, mais limitant la pénétration du terrain dans le pieu. La position du diaphragme doit être précisément réfléchi. La formation d'un bouchon permet en effet un accroissement de la capacité portante, mais implique une augmentation des sollicitations lors du battage. Il peut alors être difficile d'emmener le pieu à la côte théorique. Il faudra pourtant s'assurer qu'à minima, la fiche nécessaire à la reprise des efforts de traction ainsi qu'aux sollicitations latérales pourra être atteinte.

Un problème spécifique lié à la mise en place d'un diaphragme est l'interprétation d'un essai de chargement dynamique : la présence du diaphragme crée des réflexions d'ondes

qui perturbent énormément le signal mesuré ; l'estimation de la capacité portante par calage de signal est donc encore plus complexe.

Le dimensionnement du diaphragme et de sa liaison par soudure avec le tube métallique est aussi un problème spécifique qu'il est nécessaire de bien appréhender sans hésiter à mettre en œuvre des modélisations numériques précises.



Figure 7. Mise en place d'un diaphragme dans un tube métallique

La position ainsi que la forme du diaphragme demandant une expérience notable du sujet, il est impératif de faire appel à des spécialistes. Dans tous les cas, des essais dynamiques si possible complétés par un essai de chargement statique, sont recommandés pour valider le procédé.

5. Conclusions

Les projets comportant des pieux battus ouverts de grand diamètre conduisant à des profondeurs de battage relativement faibles (moins de 15 diamètres) doivent faire l'objet d'une attention particulière. Dans ces conditions, la mobilisation d'un bouchon de sol n'est pas automatique et la capacité portante réelle peut être significativement plus faible qu'espéré. La réalisation d'essais de chargement dynamique avec calage de signal, voire, sous réserve de faisabilité technico-économique, d'essais statiques, permet de mieux appréhender les mécanismes en jeu et de valider les estimations théoriques de portance.

L'analyse croisée de ces essais et des données de battage peut être très riche d'enseignements et permet d'établir des corrélations spécifiques au site entre le nombre de coups et la résistance statique déduite des essais de chargement dynamique.

6. Références bibliographiques

- Baguelin F., Burlon S., Bustamante M., Frank R., Gianceselli L., Habert J. and Legrand S. (2012). Justification de la portance des pieux avec la norme « Fondations profondes » NF P 94-262 et le pressiomètre. Comptes rendus Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012, Bordeaux, 4–6 juillet 2012, 577–584.
- Burlon S., Frank R., Baguelin F., Habert J. and Legrand S. (2014). Model factor for the bearing capacity of piles from pressuremeter test results – Eurocode 7 approach. *Géotechnique*, 64, 7, 513–525.
- ISO committee TC67/SC7. Norme européenne ISO 19901-4 : 2016. Industries du pétrole et du gaz naturel Exigences spécifiques relatives aux structures en mer - Partie 4: Bases conceptuelles des fondations.
- Sangseom Jeong et Junyoung Ko (2015). Inner skin friction of open-ended piles considering the degree of soil plugging. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.