

Essais de chargement statique de pieux en bois instrumentés avec des extensomètres amovibles

Timber pile load test instrumented with removable extensometers

Christin J., El Kouby A.
Université Paris Est / IFSTTAR, Marne la vallée, France

Reiffsteck P.
Terrasol, Paris, France

Rocher-Lacoste F.
Sétra, Sourdun, France

ABSTRACT: Timber piles were used in France until the 19th Century. They cannot currently be proposed in projects as they are not implemented in the French pile design methods. Nevertheless, their domain of application has widened with retrofitting and reuse of all historical structures and sustainable development. The research project "Pieux Bois" (2010-2013) has the objective of beginning to establish a database necessary for design methods. The first pile loading test campaign carried out in Rouen on piles instrumented with removable extensometers, shows interesting results.

RÉSUMÉ : Les pieux en bois, utilisés en France jusqu'au 19^{ème} siècle, ne peuvent pas à l'heure actuelle rentrer dans les méthodes de dimensionnement françaises basées sur le pressiomètre (développées dans les années 50). Néanmoins, leur domaine d'application trouve un écho favorable pour la réhabilitation de vieux ouvrages et dans la dynamique actuelle du développement durable. Le projet de recherche « Pieux Bois » (2010-2013) a pour objectif de commencer à établir la base de données nécessaire pour les règles de dimensionnement. La première campagne d'essais de pieux, instrumentés à l'aide de l'extensomètre amovible, réalisé sur le port de Rouen, donne accès à des résultats tout à fait intéressants.

KEYWORDS: Foundation, wood, timber pile, pile loading tests.

1 CONTEXTE ET ENJEUX

Le battage des premiers pieux en bois remonte à l'époque du néolithique, il y a plus de 6000 ans. A cette époque, ces pieux étaient enfoncés dans le sol à la force humaine. Les premières machines de battage dont on garde trace en Europe ont été développées au cours de l'époque romaine. Durant les époques qui suivirent l'ère romaine, de la Renaissance jusqu'à l'ère industrielle, les modes de fondations et les constructions sur pieux bois se sont développés et diversifiés, jusqu'à leur remplacement et abandon au 19^{ème} siècle par du béton immergé.

La société actuelle française a hérité de ces périodes un patrimoine très riche d'ouvrages fondés sur pieux bois. Les ponts construits sur la Loire ou la Seine, le château de Chambord ou encore le Grand Palais en sont quelques exemples.

L'abandon des pieux en bois en France a été antérieur au développement du pressiomètre par L. Ménard dans les années 1950 ; dont les résultats des essais constituent aujourd'hui la base du dimensionnement des fondations profondes en France. Il n'existe donc à ce jour aucune règle professionnelle ni de contexte normatif français permettant d'asseoir le dimensionnement de fondations de cette nature sur le territoire. Les bases de données d'essais de pieux conduisant à l'élaboration des règles de calculs et abaques de la norme NFP94-262 (AFNOR, 2012) ont été construites à partir d'essais de chargement statiques de pieux en acier et béton instrumentés sur toute leur longueur avec des extensomètres amovibles.

Le projet Pieux Bois (2010-2013), initié et piloté par l'IFSTTAR, vise à promouvoir la technique de fondations de type pieux en bois dans la construction de bâtiments et petits ouvrages. La mise en place d'un contexte normatif passe par la proposition d'une courbe de frottement unitaire limite le long du fût des pieux. La construction de cette courbe doit être réalisée selon la même méthodologie que celle qui a prévalu pour l'élaboration des courbes de références de la norme.

Ce papier présente les premiers résultats de l'étude entreprise. Dans une première partie, les caractéristiques mécaniques des pieux en bois ainsi que la technique

d'instrumentation sont résumées. La seconde partie de l'article est consacrée à la réalisation et l'interprétation des essais de chargement des pieux en bois réalisés sur un plot expérimental.

2 CARACTÉRISTIQUES DES PIEUX EN BOIS

1.1 Essences de pieux

Les pieux en bois instrumentés ont été fournis par la scierie GROUAZEL, partenaire du projet Pieux Bois. Quatre essences ont été retenues dans le cadre de cette expérimentation : le pin car il s'agit de l'essence la moins durable et ses ressources sont importantes, notamment dans le sud-ouest de la France ; le chêne car il est considéré comme l'essence la plus durable et constitue une ressource de proximité sur une partie importante du territoire français ; le hêtre qui présente des caractéristiques intermédiaire et l'acacia qui possède également une très grande durabilité, bien que la ressource soit à l'heure actuelle faible.

1.2 Caractéristiques géométriques des pieux

La conicité naturelle des troncs d'arbres a été conservée. Les pieux n'ont donc pas été équarris. Ils sont naturellement "cylindriques" et bruts. Le tableau 1 présente leur longueur, leur diamètre en tête et en pointe, ainsi que leur conicité.

Tableau 1. Caractéristiques géométriques des pieux en bois

Essence (numéro)	Longueur (m)	Diamètre tête (cm)	Diamètre pointe (cm)	Conicité (mm/m)
Hêtre (1)	5	27,2	24,4	2,8
Hêtre (2)	5	32,3	29,4	2,9
Pin (3)	5	26,7	24,2	2,5
Pin (4)	5	24,8	23,1	1,8
Chêne (5)	5	27,1	23,9	3,2
Chêne (10)	5	26,9	23,6	3,3
Acacia (8)	5	22,1	19,6	2,5
Acacia (9)	5	23,1	21,2	1,9

1.3 Caractéristiques mécaniques des pieux

La non-linéarité des pieux en bois rendant difficile le calcul de leur volume, la masse volumique des pieux a été déterminée en laboratoire à partir d'une tranche prélevée en tête de pieu.

La masse des pieux a été mesurée après usinage, c'est-à-dire après la taille de la pointe et la réalisation de la saignée accueillant les tubes logement du système de mesure.

Dans le but de disposer du module d'élasticité longitudinal moyen de chaque pieu, une analyse vibratoire couplée à un modèle aux éléments finis (MEF) a été mise en œuvre. Dans un premier temps, le profil en long de chaque pieu ainsi que leur masse totale ont été mesurés. En plaçant le pieu sur deux appuis, celui-ci a été mis en vibration libre. A l'aide de trois accéléromètres, la première fréquence propre a été obtenue par analyse fréquentielle. Après avoir réintroduit le profil en long du pieu et sa masse dans le MEF, le module moyen tenant compte d'un rapport E/G de 16 a été retrouvé pour chaque pieu.

Le tableau 2 présente les caractéristiques mécaniques des huit pieux.

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques des pieux en bois

Essence (numéro)	Masse (kg)	Masse volumique (kg/m ³)	Fréquence résonance (Hz)	Module d'Young (MPa)
Hêtre (1)	136	475	18,2	6400
Hêtre (2)	275	709	21,1	9100
Pin (3)	153	572	19,9	9370
Pin (4)	120	587	20,5	9900
Chêne (5)	201	723	16,4	8150
Chêne (10)	192	723	14,6	6980
Acacia (8)	150	806	15,2	10970
Acacia (9)	153	757	18,8	13320

1.4 Instrumentation des pieux

L'objectif de l'instrumentation des pieux en bois est de mesurer à différentes profondeurs le raccourcissement élastique du pieu en fonction de la charge appliquée en tête (Bustamante et Jézéquel, 1975). La valeur du raccourcissement permet, via la section et le module d'élasticité de chaque tronçon, de déterminer la charge reprise par chaque tronçon du pieu et donc le frottement latéral entre le pieu et le sol à différentes profondeurs.

Dans la pratique courante, la chaîne d'extensomètres amovibles est introduite dans un tube métallique solidaire du pieu, une fois le pieu foré ou battu dans le sol. La non-linéarité et la conicité naturelle du pieu, mêlées aux difficultés que représentent la fixation du tube en acier au bois rendent l'emploi de cette méthode difficile. Un dispositif d'instrumentation à l'aide d'extensomètres amovibles spécifique aux pieux en bois a donc été élaboré.

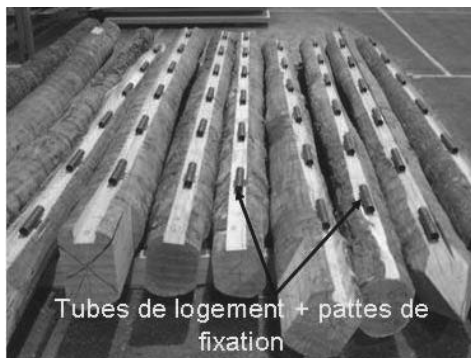


Figure 1. Usinage des pieux et fixation des tubes logement aux pattes

Dans un premier temps, une saignée de 80mm de largeur et de 60 mm de profondeur a été réalisée sur toute la longueur du pieu, au niveau de la section où le pieu était le plus rectiligne.

Des pattes de fixation, de 60mm de large et 80mm de long, ont été fixées dans la saignée au droit des futurs emplacements des bloqueurs. Les pattes étaient espacées les unes des autres de 75 cm (Figure 1).

Des fenêtres de 26cm de longueur et de 80mm de largeur ont été usinées sur un tube métallique à section rectangulaire de dimensions 80mm * 60mm. Ce tube métallique (qualifié de tube extérieur) est venu chapeauter et protéger l'ensemble « patte de fixation + tubes de logement » dans la saignée. Il a été fixé au bois avec des vis et des tirefonds (Figure 2).

La pointe des pieux a été usinée en forme pyramidale. L'extrémité du tube extérieur au niveau de la pointe a été biseautée de sorte que le biseau soit dans le prolongement d'une des faces de la pointe. La pointe a été renforcée avec 4 plats métalliques (un sur chaque face) dont l'un a été soudé au biseau du tube extérieur (Figure 2).

Deux plats diamétralement opposés et distants de 20 cm (distance constante sur tous les pieux) ont été usinés sur la tête du pieu. Ils avaient pour objectifs de faciliter la fixation du casque de battage au pieu lors de la phase chantier.



Figure 2. Tubes extérieurs dans la saignée et protection de la pointe

3 CONSTRUCTION D'UN PLOT EXPÉRIMENTAL

3.1 Caractérisation géotechnique du site

Le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) est un maître d'ouvrage public qui possède de nombreux quais fondés sur des pieux en bois de hêtre. Souhaitant s'impliquer dans le projet afin d'établir des solutions de confortement pour ses propres ouvrages, le GPMR a mis à disposition de l'IFSTAR une parcelle en bordure de Seine sur laquelle le plot expérimental a été construit.

Trois sondages à la pelle mécanique ont permis d'identifier la géologie du site (Figure 3). Le niveau moyen d'eau de la nappe sujet à marnage a été mesuré à 3,80m de profondeur.

	0m
Remblai graveleux	0,55m
Limon-argileux (couleur gris foncé)	2,50m
Matériaux sablo-graveleux (couleur gris clair) Grattage de la tarière à partir de 2,3m de profondeur, présence éventuelle de blocs de craies	4,20m
Argile sableuse	>7m

Figure 3. Coupe géologique du site

Des essais d'expansion au pressiomètre Ménard, de pénétration dynamique avec un pénétromètre type PANDA, des essais de pénétration statique au piézocône (CPT) et des essais de pénétration au carottier (SPT) ont été réalisés sur le site expérimental, à proximité de la zone de battage des pieux (Figure 4).

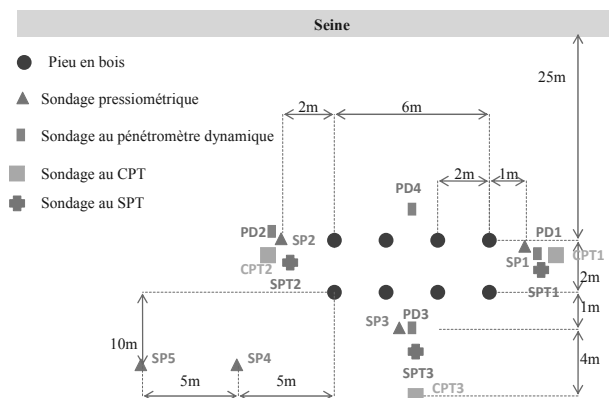


Figure 4. Plan d'implantation des sondages

Le tableau 3 présente les résultats des différents sondages réalisés, ainsi que le modèle géotechnique retenu pour le site.

Tableau 3. Caractéristiques géotechniques de sol et modèle de terrain

Couche /prof de fin de couche (m)	q_d (MPa)	p_l (MPa)	q_c (MPa)	N_{SPT}
Limons argileux / 2,50	$5,2 < q_d < 19,2$ $q_{d,moyen} = 10,3$	$0,21 < p_l < 0,55$ $p_{l,moyen} = 0,4$	$0,1 < q_c < 2,8$ $q_{c,moyen} = 0,5$	$5 < N_{SPT} < 8$
Sable grave / 4,20	$7,5 < q_d < 41,1$ $q_{d,moyen} = 14,3$	$0,80 < p_l < 1,40$ $p_{l,moyen} = 1$	$1,1 < q_c < 10$ $q_{c,moyen} = 4,5$	$18 < N_{SPT} < 33$
Argile sableuse / >6,70	X	$0,42 < p_l < 0,91$ $p_{l,moyen} = 0,62$	$0,5 < q_c < 6,9$ $q_{c,moyen} = 1,9$	$21 < N_{SPT} < 27$

3.2 Battage des pieux

Les pieux en bois ont été battus avec un trépied pneumatique de 600kg. Ce marteau développait une énergie par coup comprise entre 2100 et 2360 joules, équivalent à la chute d'un mouton de 83kg d'une hauteur fictive de 2,63m.

Un casque de battage, constitué de 3 plats métalliques fixés à la tête de pieux et d'un HEB200 faisant office de raccord entre la tête des pieux et le marteau a été mis en place sur les têtes des pieux. L'objectif était de protéger la tête des pieux du marteau pneumatique et donc d'éviter toute fissuration ou fracturation du pieu (Figure 5).

Au niveau de la zone de battage, la couche de remblai a été remplacée par des regards en béton remblayés avec du limon argileux. Les pieux étaient distants les uns des autres longitudinalement et transversalement de 2m (Figure 5). Ils ont été mis en fiche à 4,6 m de profondeur en environ 3 minutes.

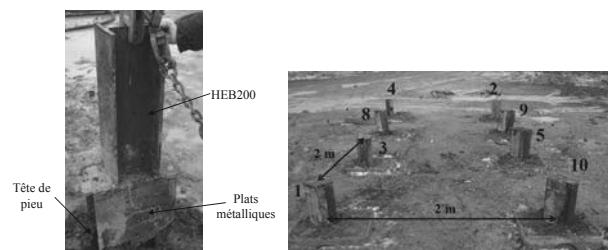


Figure 5. Casque de battage et plan d'implantation des pieux

4 ESSAIS DE CHARGEMENT

4.1 Réalisation des essais de chargement

Les 8 pieux en bois ont été chargés en compression. Le massif de réaction était composé d'une poutre de chargement constituée de 2 HEB900 accolés et soudés de 6,50m de long. Deux traverses étaient posées perpendiculairement aux extrémités de la poutre. Les micropieux du massif de réaction assurent alors la reprise des efforts.

L'effort en tête de pieu a été appliqué à l'aide d'un vérin hydraulique de 3MN et d'une pompe. Une rotule était installée au dessus du vérin afin d'éviter la transmission de moments de flexion. Les enfoncements verticaux de la tête du pieu ont été mesurés à l'aide de 4 comparateurs potentiométriques au 1/100^e mm, montés sur des bases de référence fixes. Malgré la protection de la tête des pieux par un casque métallique lors du battage, certaines têtes de pieux se sont fissurées sous les coups du marteau hydraulique. Afin d'éviter une fracturation de la tête des pieux lors des essais de chargement, un casque métallique a été installé (Figure 6).

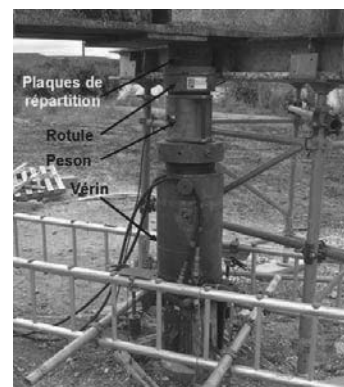


Figure 6. Dispositif de chargement

4.2 Courbes de chargement et fluage des pieux

La norme NFP94-262 (AFNOR, 2012) stipule que la rupture du pieu sous charge axiale est atteinte lorsque l'enfoncement de la tête de pieu est supérieure à 10% de son diamètre. Ce critère de rupture a été retenu pour les essais de chargement.

La Figure 7 présente les courbes de chargement des 8 pieux testés. Aucun pieu n'a rompu au niveau de sa structure.

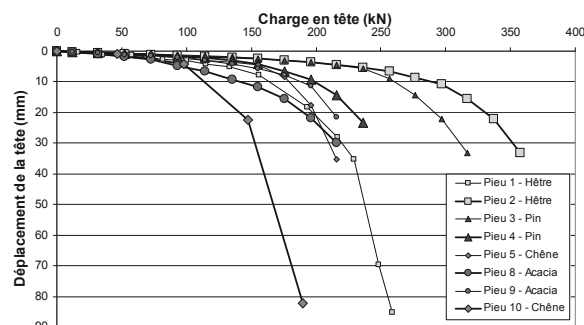


Figure 7. Courbes de chargement

4.3 Mesures extensométriques

L'instrumentation des pieux avec des extensomètres amovibles a permis de déterminer la distribution des efforts le long du fût et la résistance de pointe durant l'essai de chargement. L'hypothèse d'un comportement élastique linéaire isotrope de chaque tronçon de pieu a permis de déterminer l'effort repris par le tronçon i selon la loi de Hooke :

$$Q_i = \frac{E \cdot S_i \cdot \Delta l_i}{l_i} \quad (1)$$

Avec E le module d'élasticité du matériau du pieu issu du tableau 2, S_i la section du tronçon i calculée à partir du tableau 1, l_i et Δl_i la longueur et le raccourcissement du tronçon i .

Le frottement latéral unitaire q_{si} repris par le tronçon i s'exprime de la façon suivante :

$$q_{si} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{S_{latérale}} \quad (2)$$

La résistance de pointe a été calculée par extrapolation de l'effort repris par le tronçon du dessus : la différence des efforts repris par la pointe (Q_p) et le tronçon A (Q_A) était identique à

celle des efforts repris par les tronçons A et B (Q_B), modulant les longueurs des tronçons.

$$Q_p = Q_A - (Q_B - Q_A) \frac{H_p}{H_A} \quad (3)$$

Les mesures des raccourcissements unitaires Δl ont été effectuées à l'aide d'un chapelet d'extensomètres amovibles délimitant 5 tronçons de mesure de 75 cm. Ils sont mesurés au micromètre.

La Figure 8 présente la déformation du bas de chaque tronçon du pieu n°1 en fonction de l'effort appliqué en tête, ainsi que la distribution des efforts le long du fût.

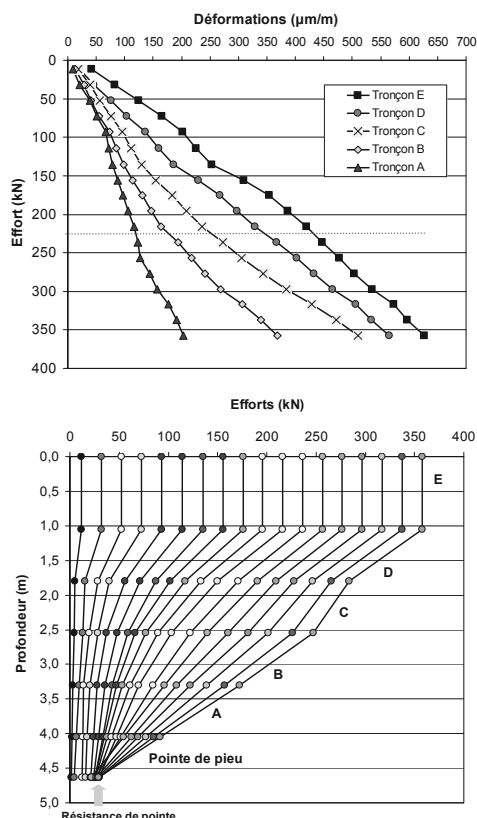


Figure 8. Déformations unitaires et distribution de charge du pieu n°1

A effort constant, les déformations les plus importantes sont mesurées sur le tronçon E, situé en dessous de la tête du pieu. La diminution progressive des déformations des tronçons E à A montre que les tronçons reprennent une partie de l'effort appliqué en tête de pieu par frottement avec le sol.

On observe une rupture de pente pour un effort de 220kN, plus marquée sur les tronçons A, B et C que sur les tronçons D et E. Cet effort marque la limite entre le domaine élastique et le domaine plastique du sol à l'interface sol-pieu.

Pour une charge inférieure à 220kN, les déformations des tronçons évoluent pseudo-linéairement avec l'effort appliqué en tête. On retrouve cette relation pseudo-linéaire entre la charge appliquée en tête et le tassement du pieu dans le sol. Jusqu'à 220kN, la mobilisation du frottement le long du pieu augmente avec la charge.

Pour une charge supérieure à 220kN, l'évolution des déformations des tronçons en fonction de l'effort appliqué en tête n'est plus linéaire. Le frottement à l'interface sol-pieu est intégralement mobilisé. Le sol à l'interface commence à fluer.

La distribution des efforts permet de remonter à la loi de mobilisation du frottement des tronçons du pieu en fonction de leur déplacement. Les courbes (Figure 9) sont caractérisées par une phase pseudo-linéaire, une rupture de pente puis un plateau (ou un pic) représentatif de l'atteinte du frottement latéral maximum.

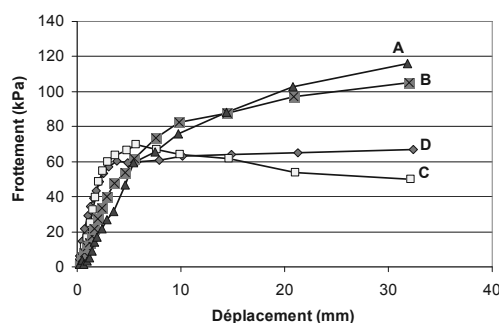


Figure 9. Mobilisation du frottement en fonction du déplacement - pieu n°1

4.4 Synthèse des résultats

Les valeurs du frottement latéral unitaire des pieux en fonction de la pression limite du terrain sont présentées sur la Figure 10.

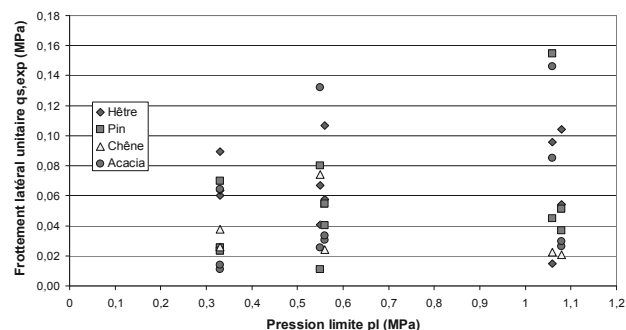


Figure 10. Frottement latéral unitaire en fonction de la pression limite

La dispersion des valeurs du frottement latéral unitaire en fonction de la pression limite montre que la nature de l'essence de bois n'a pas d'influence sur le comportement du pieu dans le sol.

Les mesures de résistance de pointe des pieux ont permis de déterminer un coefficient de portance $k_{p,exp}$. Il est défini comme le ratio entre la résistance de pointe unitaire $q_{p,exp}$ et la pression limite équivalente p_{le}^* sous la fondation qui a été prise égale à 0,75Mpa dans l'argile sableuse. La moyenne des coefficients de portance issus des résultats expérimentaux est de 2,15.

5 CONCLUSIONS

Les essais de chargement réalisés sur des pieux en bois de différentes essences ont permis de déterminer des premières valeurs du frottement latéral unitaire et de la résistance de pointe. Ces valeurs sont nécessaires à la proposition d'une courbe de frottement unitaire limite le long du fût des pieux en bois.

Ces essais ont mis en évidence que la nature de l'essence n'interviendrait pas dans les caractéristiques mécaniques de l'interface sol-bois.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le projet Pieux Bois, le GPMR le SETRA et l'entreprise GTS pour leur aide et leur contribution apportée durant le projet. Les auteurs remercient également le MEDDE pour le financement du projet dans le cadre du programme C2D2.

7 REFERENCES

Bustamante M. et Jézéquel J.-F. 1975. Mesure des élongations dans les pieux et tirants à l'aide d'extensomètres amovibles, *Travaux* (489) AFNOR, Norme NFP94-262. 2012. Justification des ouvrages géotechniques, normes d'application nationale de l'Eurocode 7.