

# Proposition d'une nouvelle courbe P-y à partir des courbes pressiométriques

## PROPOSITION OF A NEW P-Y CURVE DERIVED FROM PRESSUREMETER CURVES

Rim BACCARA<sup>1,2</sup>, Sébastien BURLON<sup>1</sup>, Philippe REIFFSTECK<sup>1</sup>, Wissem FRIKHA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne La Vallée, France

<sup>2</sup> Université Tunis El Manar, Laboratoire Ingénierie Géotechnique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisie

**RÉSUMÉ** – Dans cet article, on traite de l'estimation des déplacements horizontaux des pieux soumis à des chargements transversaux et de l'étude de leur comportement. Nous nous proposons de développer une méthode de construction des courbes p-y basée sur l'utilisation, point par point, des courbes pression-volume issues d'un essai au pressiomètre. Les courbes P-y proposées sont confrontées à d'autres méthodes de prévision et aux résultats expérimentaux d'un essai de chargement transversal de pieu en vraie grandeur.

**ABSTRACT** – In this paper, the assessment of horizontal displacements of piles subjected to transverse loadings and the study of their behaviour is addressed. There we propose to develop a method of construction of P-y curves which is based on the use of pressuremeter test curves considering a point by point approach. The P-y curves proposed there are compared with other methods of prediction and the experimental results of a transverse loading test on pile.

### 1 Introduction

Certains ouvrages, comme les éoliennes terrestres ou marines et les plates-formes pétrolières, subissent des sollicitations transversales considérables dues généralement au vent et à la houle. Ces sollicitations sont éventuellement transmises aux fondations qui supportent la structure.

Quand un pieu est sollicité transversalement, il résiste soit en se déplaçant soit en fléchissant. Dans les deux cas, le pieu mobilise des réactions dans le sol pour équilibrer les charges appliquées. Pour analyser le comportement des pieux chargés transversalement, une modélisation permettant le calcul des déplacements et des efforts est nécessaire.

Les méthodes existantes pour l'analyse de ce comportement consistent essentiellement en la méthode de la résistance transversale ultime (Broms, 1964), la méthode des modules de réaction (Ménard, 1969) et la méthode des éléments finies. Dans ce papier, nous proposons une nouvelle courbe de réaction P-y. Cette méthode de prévision est mise en œuvre pour le site de Planoët où des essais sur pieux en vraie grandeur ont été réalisés par Baguelin et Jézéquel (1972). Nous avons réalisé des essais au pressiomètre sur le même site.

## 2 Etude expérimentale : site de Plancoët

### 2.1 Description du site

Le site est constitué d'une parcelle plane au bord du fleuve l'Arguenon à Plancoët ( Côtes d'Armor, France). La Figure 1a présente l'emplacement de la station d'essais dans le site. La superposition de la vue du site lors des essais réalisés au début des années 70 et de la vue actuelle montre que le fleuve a subi un changement morphologique instaurant ainsi une nouvelle limitation des lits (Figure 1a). Le site a été le lieu d'essais de chargement axial et transversal de pieux.

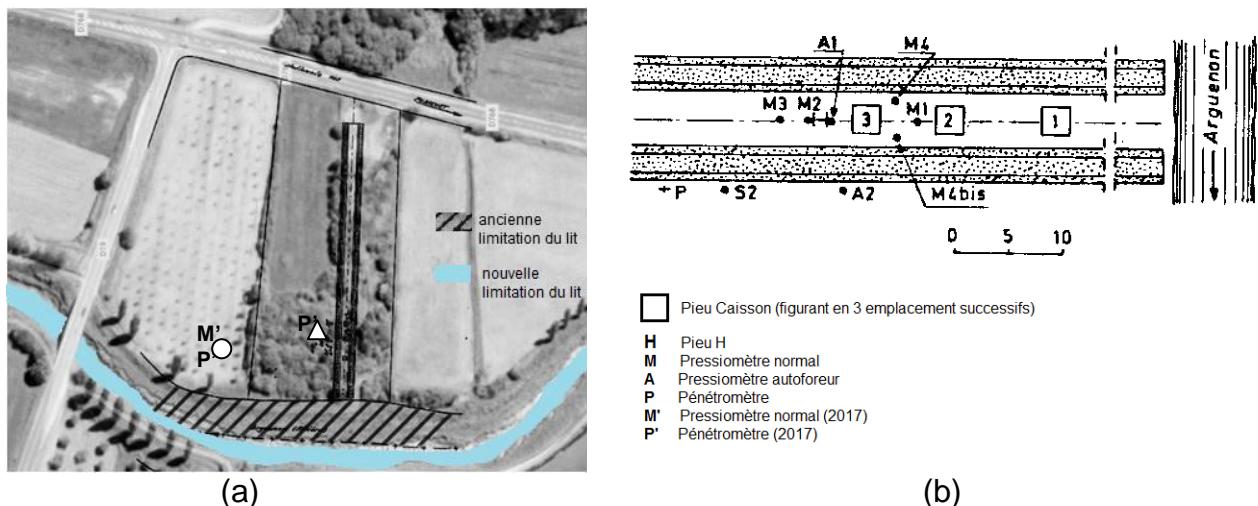


Figure 1. Emplacement de la station d'essais et vue plane du site de Planoët  
(Baguelin et Jézéquel, 1972)

La première campagne d'essais d'identification a été réalisée par les laboratoires des ponts et chaussées dans les années 70. Ces essais consistent en des essais in-situ (pressiomètre et pénétromètres) ainsi que des essais au laboratoire (œdomètre, triaxial). Dans son ensemble, le sol est constitué de sols fins très lâches, avec cependant des lentilles de graviers et sables, plus fréquentes vers 7 à 10 m de profondeur. Le substratum se trouve vers 15 à 16 m de profondeur. La nappe fluctue au cours des saisons entre 0,30 et 1,50 m de profondeur environ par rapport au terrain naturel (Baguelin et Jézéquel, 1972). Nous avons réalisé une deuxième campagne d'essais complémentaires en 2017 dont le but est de vérifier la première campagne. Le Tableau 1 présente une synthèse des résultats obtenus à partir des essais de laboratoire des deux campagnes d'essais pour les premiers 4 mètres de profondeur.

Tableau 1. Résultats d'essais de laboratoire aux premiers 4 mètres de profondeur

Profondeur M	Classification LPC	W %	W <sub>L</sub>	I <sub>P</sub>	γ <sub>d</sub>	e	S <sub>r</sub> %	C <sub>u</sub> bar	φ <sub>cu</sub>	C'	φ'
0 (fond de fouille)	Argile peu plastique	37	35	16	1,32	1,007	97	0,46	13°	0	34°
1	//	37,5	40,5	14,5							
1,50	//	55	46	25	1,08	1,453	100	0,23	15°	0	35°
2,50	//	42	30	14	1,23	1,153	96	0,28			
3,50	Sable fin	42	Non plastique		1,22	1,172	96	0,29		0	35°

Les essais préssiométriques faits dans les années 70 ont été réalisés au voisinage immédiat des pieux sur lesquels des essais de chargement transversal ont été réalisés (Figure 1b). Les essais pressiométriques réalisés en 2017 sont effectués à côté de l'ancienne station d'essai à cause de l'inaccessibilité du site (endroit représenté par un cercle sur la Figure 1a). La Figure 2 présente les modules pressiométriques issus des essais M2, M4 et M4 bis et la Figure 3 présente les pressions limites issues des essais M2, M4 et M4 bis ainsi que les essais réalisés en 2017. Le forage de M2 est réalisé au voisinage du pieu en H. les forages de M4 et M4 bis sont relatifs au pieu caisson (une moyenne des résultats a été effectuée). Les valeurs des pressions limites des essais réalisés en 2017 sont plus en concordance avec les résultats des essais M2. Une analyse globale de ces essais montre que la couche supérieure (entre 1 m et 3,5 m) est de qualité médiocre (pression limite de l'ordre de 2 bars). En dessous de 3,5 m , la pression limite est de l'ordre de 3 à 4 bars, ce qui confirme qu'il s'agit d'un sable lâche.

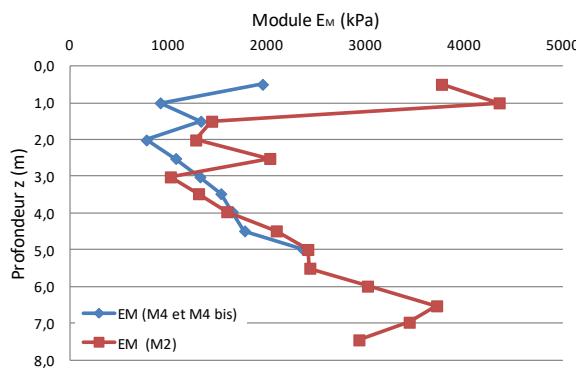


Figure 2. Modules pressiométriques issus des essais M2 et M4 et M4 bis (Baguelin et Jézéquel, 1972)

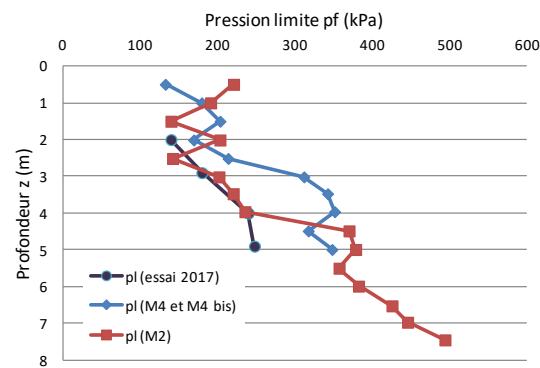


Figure 3. Pressions limites issues des essais M2, M4, M4 bis et des essais réalisés en 2017

## 2.2 Essais de chargement horizontal : pieux d'essais

Des essais de chargement ont été effectués sur deux types de pieux: pieu caisson et pieu H. Les principales caractéristiques géométriques et mécaniques sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Principales caractéristiques géométriques et mécaniques du pieu en H et du pieu caisson

	Pieu H : HE 280 A	Pieu caisson
Longueur totale (m)	8	6
Fiche dans le sol (m)	6,10	4,4
Largeur frontale (B) (m)	0,28	0,95
Inertie ( $\text{cm}^4$ )	13673	387400
$I / v$ ( $\text{cm}^3$ )	1010	8201
Section d'acier ( $\text{cm}^2$ )	97,3	403

Les deux pieux sont mis en place par vérinage. Le pieu caisson a été vériné à une vitesse de pénétration de 5cm/mn. Le pieu H a été mis en place en deux phases, jusqu'à 5,2 m puis jusqu'à 6,1 m après 20 jours.

Malgré la géométrie complexe du pieu caisson (Figure 4a), la mise en place des capteurs de mesure a été aisée, vu son caractère creux contrairement au pieu H.

Pour le pieu caisson, considéré comme rigide, les déplacements horizontaux ( $y$ ) sont déterminés à partir des comparateurs mécaniques situés à l'opposé du point d'application de la charge séparés d'1 mètre (Figure 4a). Quatre comparateurs sont placés en haut du pieu en H au-dessus de niveau du point d'application de la charge (Figure 4b)

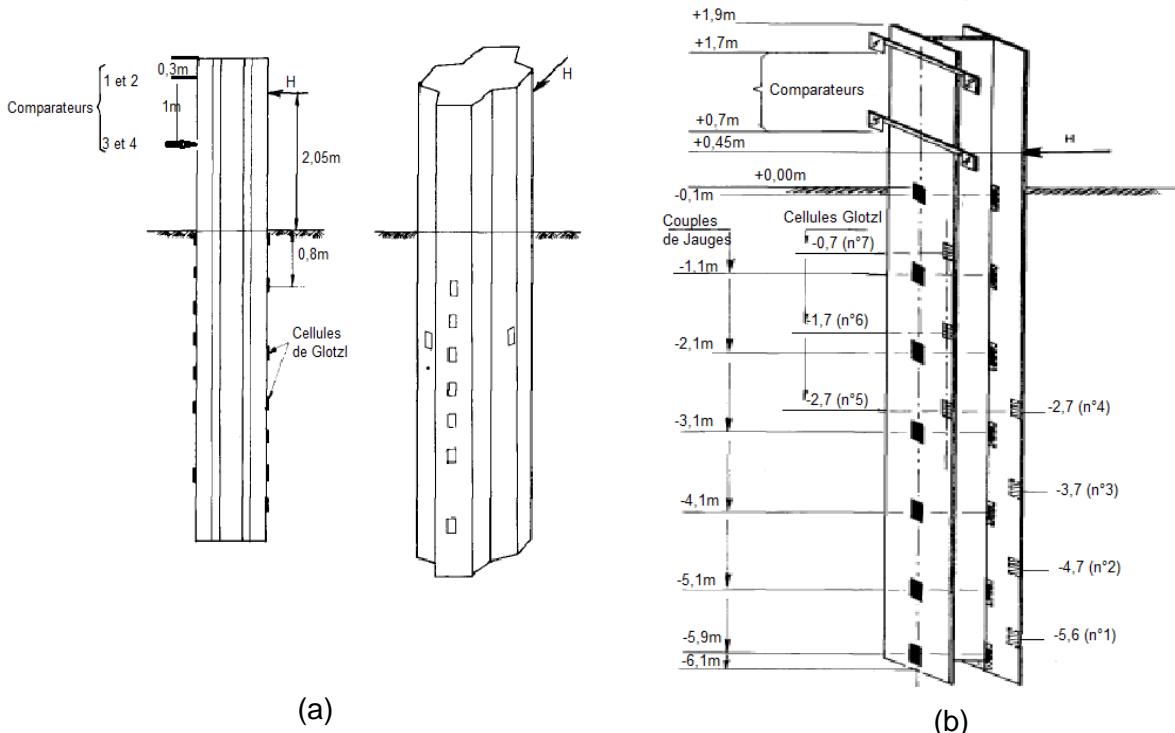


Figure 4. Disposition de divers appareils de mesure pour  
 (a) Pieu caisson et (b) Pieu en H (Baguelin et Jézéquel 1972)

Seul le pieu caisson a été instrumenté par un système permettant de mesurer sa déformée réelle vu son caractère creux. Le système est constitué de 5 comparateurs électriques en contact avec la surface intérieure du pieu et fixés sur une tige rigide encastrée en tête.

Le pieu H est instrumenté par un système de mesure de contrainte à l'aide de 14 jauge dont la disposition est schématisée à la Figure 4b.

Les moments sont déduits à partir de la formule suivante

$$\sigma = \frac{M}{I/v} \quad (1)$$

Avec  $\sigma$  la contrainte ;  $M$  le moment de flexion et  $I/v$  le module de flexion élastique.

Les contraintes sont déterminées à partir de la loi de Hooke, dans le cas de pieu caisson, en utilisant les mesures de la déformée.

Les mesures de la pression sont effectuées au moyen de cellules de pression totale de type Glotzl. Pour le pieu caisson, 14 cellules étaient utilisées et 7 cellules pour le pieu en H (Figure 4).

Les efforts horizontaux étaient exercés à l'aide d'un vérin hydraulique actionné par une pompe manuelle et contrôlé par peson. L'essai sur le pieu caisson n°3 (Figure 1) est un essai de chargement par palier de 2,2 tonnes par 30 minutes. Le point d'application de la charge est à 2,05m du fond de fouille (Figure 4a). Les paliers de chargement de l'essai

sur le pieu en H sont d'environ 0,76 tonnes par 10 minutes, sauf le premier palier qui est de 0,46 tonnes. Le point d'application de la charge est à 0,45m (Figure 4b).

### 3 Exploitation des résultats expérimentaux

Pour un pieu considéré comme une poutre élastique soumise à un chargement réparti  $P(z)$ .  $P(z)$  est en effet la réaction du sol en fonction de la profondeur ( $z$ ) dont l'unité est kN/m. Son équation d'équilibre s'écrit :

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + P(z) = 0 \quad (2)$$

La relation entre le moment et le déplacement horizontal en fonction de la profondeur s'écrit :

$$\frac{M(z)}{EI} = \frac{d^2 y}{dz^2} \quad (3)$$

Les équations (2) et (3) permettent d'obtenir la relation entre les réactions du sol  $P(z)$  et les moments internes  $M(z)$  du pieu. La pression à l'interface de contact sol-pieu ( $p$ ) est définie par :

$$p(z) = \frac{P(z)}{B} \quad (4)$$

avec  $B$  la largeur frontale du pieu, et peut aussi s'exprimer en fonction de  $M(z)$  comme suit :

$$p(z) = -\frac{1}{B} \frac{d^2 M(z)}{dz^2} \quad (5)$$

A partir d'une double dérivation du moment par rapport à la profondeur, on peut obtenir directement l'évolution de la pression à l'interface en profondeur.

Plusieurs méthodes ont été développées pour déterminer la pression à partir des moments mesurés telles que la méthode des différences finies, la méthode de Matlock et la méthode des Splines.

La méthode la plus simple est la méthode des différences finies, qui utilise 3 points de mesure de moment ( $M_{i-1}$  à  $M_{i+1}$ ) et permet de déterminer une valeur moyenne de la pression par la formule :

$$p_i = -\frac{1}{B} \frac{M_{i-1} - 2M_i - M_{i+1}}{(\Delta z)^2} \quad (6)$$

La méthode de Matlock (1956) consiste à utiliser 5 points de mesure des moments ( $M_{i-2}$  à  $M_{i+2}$ ) et la valeur moyenne de la pression est donnée par :

$$p_i = -\frac{1}{7B} \frac{2M_{i-2} - M_{i-1} - 2M_i - M_{i+1} + 2M_{i+2}}{(\Delta z)^2} \quad (7)$$

Les déplacements horizontaux sont obtenus par double intégration des moments d'après l'équation (3). Les conditions aux limites sont déterminées à partir des mesures issues des comparateurs.

#### 4 Prévision des courbes P-y utilisant les données pressiométriques

A une profondeur donnée, le comportement du pieu est décrit par l'expression de la réaction du sol ( $P$ ) en fonction du déplacement horizontal du pieu ( $y$ ) qu'on appelle courbe  $P - y$ . Les méthodes les plus utilisées pour la prévision de ces courbes dérivent de la méthode des modules de réaction qui se base essentiellement sur la théorie de Winkler (1867). Cette dernière modélise le sol comme des couches élastiques, indépendantes superposées définies par des ressorts de raideur  $k_h$  (coefficient de réaction du sol), sur lesquels s'appuie le pieu. Le module de réaction, couramment noté  $E_s$  ou  $K$ , est relié au coefficient de réaction par :

$$E_s \text{ ou } K = k_h * B \quad (8)$$

On peut citer la méthode de Ménard, adoptée ultérieurement par la norme française (fascicule 62), et la méthode de Briaud dans sa simple approche SALLOP qui exploitent les résultats pressiométriques. Le Tableau 3 présente les modules de réaction et leurs origines pour les deux méthodes mentionnées.

Tableau 3. Méthodes de Ménard et de Briaud pour prévision des courbes  $P - y$

Méthode	Module de réaction	Origine
	Module pressiométrique	
Ménard (1969)	$\frac{E_s}{E_M} = \begin{cases} \frac{12}{4\left(\frac{B_0}{B}\right)\left(2,65\frac{B}{B_0}\right)^\alpha + \frac{\alpha}{2}} & \text{pour } B \geq 0,6m \\ \frac{12}{\frac{4}{3}(2,65)^\alpha + 3\alpha} & \text{pour } B \leq 0,6m \end{cases}$	formule du tassement vertical d'une fondation superficielle $E_M$ : module pressiométrique
Briaud (1997)	$\frac{K}{E_0} = 2,3$	Empirique $E_0$ : module pressiométrique

Nous proposons dans ce papier une méthode de prévision qui se base sur les résultats directs des essais au pressiomètre Ménard, point par point (PPP). Le déplacement horizontal du pieu peut être écrit en fonction de  $\Delta V/V_0$  comme suit (Bigot et al, 1982) :

$$y = \frac{\Delta V}{V_0} * \frac{B}{4} \quad (9)$$

La réaction du sol sur les pieux  $P_{pile}$  est définie en fonction des pressions issues d'un essai d'expansion (pressiomètre) par :

$$P_{pile} = \psi * (p - p_0) * B \quad (10)$$

$\psi$  est un coefficient d'ajustement.

Les courbes d'expansion au pressiomètre utilisées sont celles des essais réalisés en 2017.

La Figure 5 et la Figure 6 présentent des comparaisons entre les courbes  $P - y$  de prévision par la méthode Ménard, la méthode Briaud, la nouvelle méthode de prévision PPP et les valeurs expérimentales à différentes profondeurs. Les valeurs des réactions expérimentales sont obtenues en utilisant l'équation (4), en multipliant les valeurs de pression mesurées ou déterminées par la méthode Matlock par la largeur frontale des pieux.

Pour le pieu en H, et à des profondeurs aux environs de 2 m et 4 m les courbes de prévision Ménard et Briaud sont très optimistes, quand les déplacements sont importants (au-delà de 2% de déplacement relatif  $y/B$ ) (Figure 5). Les courbes issues de la méthode PPP décrivent bien les valeurs expérimentales, avec des coefficients d'ajustement  $\psi$  1,2 et 1 ce qui approuve la similitude entre les réactions du pieux sous charge transversale et les sollicitations d'expansions cylindriques (essai pressiométrique).

Pour le pieu caisson, les courbes Ménard et Briaud sont très pessimistes au voisinage de l'origine et en s'éloignant de la surface (à 4m) (Figure 6). Pour les courbes PPP, on utilise un coefficient d'ajustement  $\psi$  supérieur ou égal à 3 pour s'approcher des valeurs expérimentales.

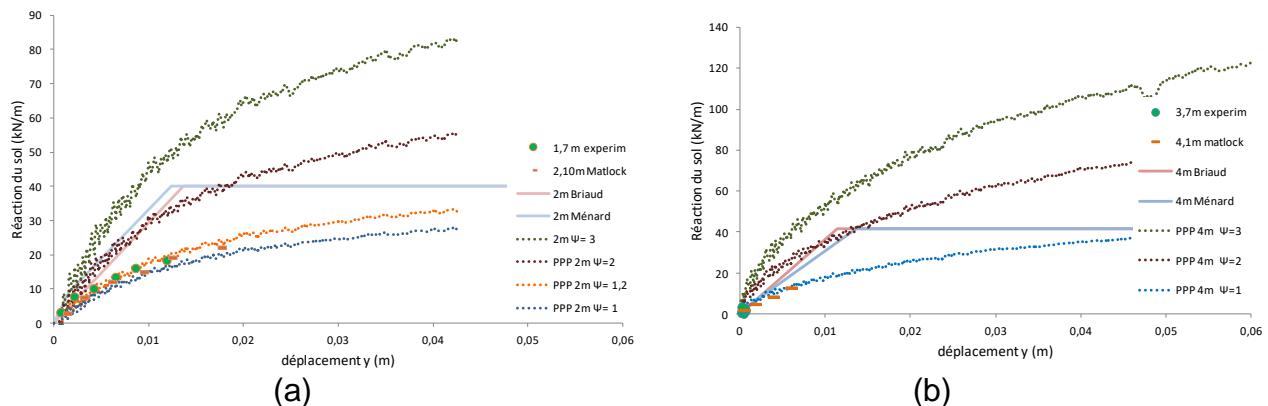


Figure 5. Courbes p-y pour le pieu en H à environ

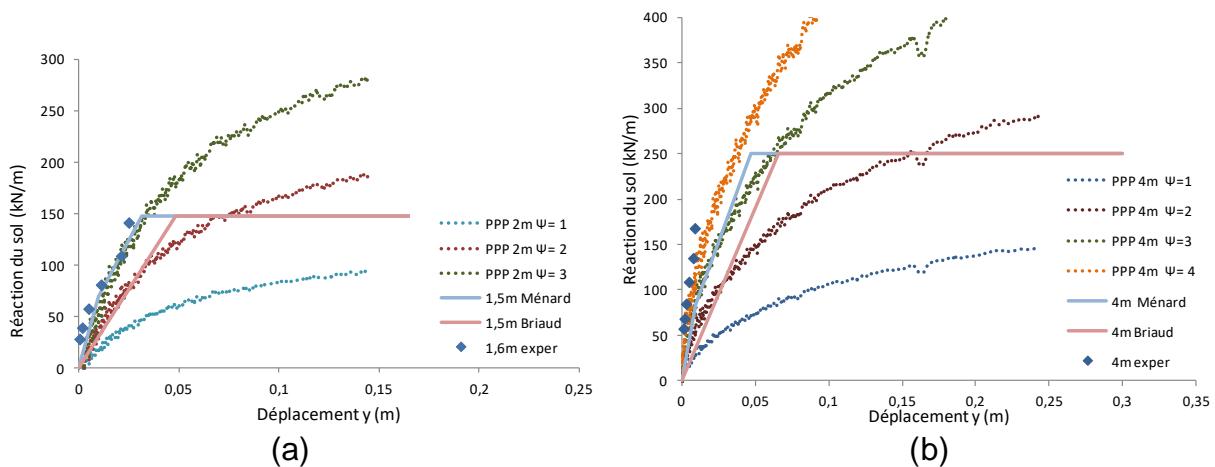


Figure 6. Courbes p-y pour le pieu caisson à environ

## 5 Conclusion

Nous avons présenté ici, tout d'abord, l'étude expérimentale du site de Planoët sur laquelle des essais de chargement transversal sur pieux (Baguelin et Jézéquel, 1972) et des essais pressiométriques ont été réalisés. Ensuite, la méthode d'exploitations des mesures des essais sur pieu a été exposée. Puis, nous avons présenté la nouvelle courbe P-y proposée par ce papier et nous l'avons comparée avec d'autres méthodes de prévision de comportement des pieux sous charge transversale et des résultats expérimentaux des essais sur pieux.

La nouvelle courbe P-y est en bonne concordance avec les résultats expérimentaux pour des déplacements relativement faibles. Le coefficient d'ajustement  $\psi$  pourrait éventuellement dépendre du déplacement horizontal du pieu.

## 6 Références bibliographiques

- Baguelin F., Jézéquel J-F. (1972). Etude expérimentale du comportement de pieux sollicités horizontalement. Séance d'étude I.T.B.T.P du 30 novembre 1971, Annales de l'I.T.B.T.P., série Sols et Fondations N° 91, septembre 1972, suppl. au N° 297, pp. 153-204
- Bigot G., Bourges F., Frank R. (1982). Etude expérimentale d'un pieu soumis aux poussées latérales du sol. Revue Française de Géotechnique N° 18, février, pp. 29-47.
- Briaud J.L. (1997). SALLOP: Simple approach for lateral loads on piles. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 123, pp. 958-964
- Broms B.B. (1964). Lateral resistance of piles in cohesionless soils. J Soil Mech Found Div – ASCE;90(3):123–56.
- Fascicule 62, Titre V (1993). Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil.
- MATLOCK H. , RIPPERGER E.A. (1956). Procedures and instrumentation for tests on a laterally loaded pile, Proc 8th Texas Conf. on Soils Mechanics and Foundation Engineering. Research University of Texas, Austin.
- Ménard L., Bourdon G. et Gambin M. (1969). Méthode générale de calcul d'un rideau ou d'un pieu sollicité latéralement en fonction des résultats pressiométriques. Sols-Soils, n°22-23, Vol. VI.
- MÉNARD L., ROUSSEAU J. (1962). L'évaluation des tassements. Tendances nouvelles. Sols - Soils, 1, pp. 13-28.
- Winkler (1867), Die lehrevon der elastizitätundfestigkeit, Verlag.